

# Мікросистеми та фізична електроніка

УДК 621.38(075.8)

DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.5.146335](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.5.146335)

## Рекордная эффективность солнечных батарей на варизонных тринитридах квантовых энесторов-зонисторов

Осинский<sup>f</sup> А. В., к.т.н., ORCID [0000-0001-9532-5593](https://orcid.org/0000-0001-9532-5593)e-mail [andrei.osinsky@agnitron.com](mailto:andrei.osinsky@agnitron.com)

Agnitron Technology

Уден Прайрей, МН, США

Дягилев<sup>f</sup> А. В., ORCID [0000-0002-9108-1576](https://orcid.org/0000-0002-9108-1576)e-mail [diagilev.av@gmail.com](mailto:diagilev.av@gmail.com)Борисов А. В., к.т.н. проф., ORCID [0000-0003-4553-3591](https://orcid.org/0000-0003-4553-3591)e-mail [a.borisov@kpi.ua](mailto:a.borisov@kpi.ua)

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Киев, Украина

Ляхова Н. Н., ORCID [0000-0001-5790-9432](https://orcid.org/0000-0001-5790-9432)e-mail [lyahova.natalia.n@gmail.com](mailto:lyahova.natalia.n@gmail.com)Оначенко М. С., ORCID [0000-0001-7489-5642](https://orcid.org/0000-0001-7489-5642)e-mail [maximonachenko@gmail.com](mailto:maximonachenko@gmail.com)Суховий Н. О., ORCID [0000-0002-8649-4536](https://orcid.org/0000-0002-8649-4536)e-mail [ninaliakhova@gmail.com](mailto:ninaliakhova@gmail.com)

НИИ Микроприборов НАН Украины

Киев, Украина

Масол И. В., к.т.н., ORCID [0000-0002-1262-7076](https://orcid.org/0000-0002-1262-7076)e-mail [masol@rostok.ua](mailto:masol@rostok.ua)

Частное Акционерное Общество «Компания Росток»

Киев, Украина

Осинский<sup>s</sup> В. И., д.т.н. проф., ORCID [0000-0001-8965-7444](https://orcid.org/0000-0001-8965-7444)e-mail [osinsky77@gmail.com](mailto:osinsky77@gmail.com)

НИИ Микроприборов НАН Украины

Киев, Украина

**Реферат**—Разработана новая квантовая оптимизация накопления энергии излучения Солнца в энесторах на многокомпонентных твердых растворах  $A^3B^5$ :  $BAIGalnNPAsSb$ .

Рассматриваются следующие методы увеличения эффективности солнечных батарей: 1. Накопление носителей в глубоких потенциальных ямах и квантовых точках; 2. Усиление тока, управляемое классическими кремний-транзисторными и квантовыми процессорами; 3. Квантовые вычисления оптимальных потоков электронов, которые образуют квантово-размерные куперовские пары, аналогично высокотемпературной сверхпроводимости; 4. Варизонное и гетерогенное расширение спектра поглощения излучения Солнца; 5. Бездефектные согласующие темплетные гетерослои в селективной нанозпитаксии; 6. Интеграция выпрямления СВЧ терагерцовых сигналов в нанопористых структурах ректен терагерцового диапазона; 7. Накопление энергии в графеновых



суперконденсаторах, полученных в самоорганизованных нанопорах  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 8. Увеличение поглощения фотонов вертикальными стенками нанопор частично эпитаксиально зарощенными основным материалом кремнием или твёрдыми растворами  $\text{A}^3\text{B}^5$ .

Разработанные технологии позволяют существенно, в 2–5 раз, увеличить энергетическую эффективность солнечных батарей на Si/III-нитридных наноструктурах.

Библ. 18, рис. 9, табл. 1.

**Ключевые слова** — III-нитриды; солнечные батареи; гетерогенные твёрдые растворы  $\text{A}^3\text{B}^5$ ; накопление энергии; энесторы; зонисторы; ректенны

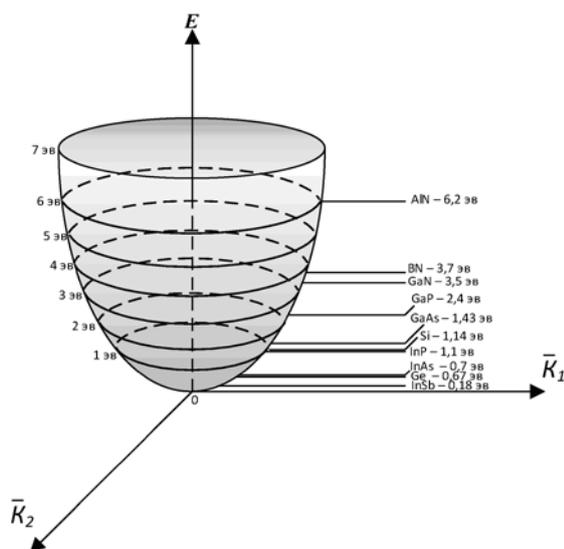


Рис. 1 Глубокая потенциальная яма бинарных соединений  $\text{A}^3\text{B}^5$ , непрерывная структура которой обеспечивается системой твёрдых растворов  $\text{BAlGaInNPAsSb}$ . Приведены также энергии запрещённых зон популярных полупроводников кремния и германия

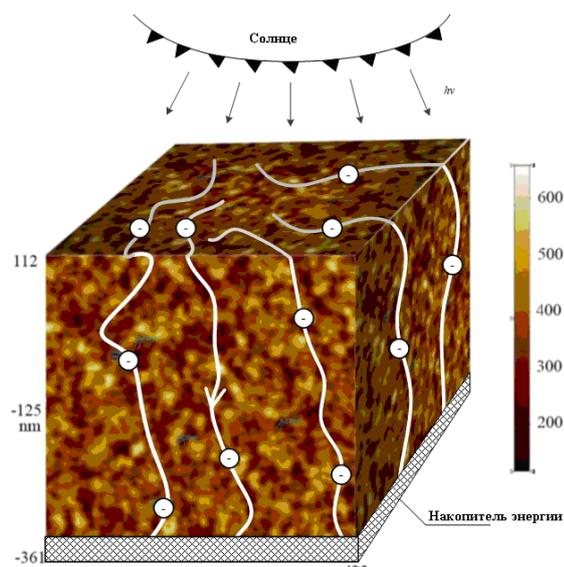


Рис. 2 3D АСМ-изображение нанопористого фрагмента энестора с  $R_c \leq 10$  нм, реализованное на нанотекстурированном сапфире и оптимальные квантовые каналы движения электронов к элементу аккумуляции энергии

## I. ВВЕДЕНИЕ

Энестор-зонистор представляет собой квази-полевой транзистор в котором канал и затвор выполнены в варизонном слое твёрдого раствора переменного состава системы  $\text{BAlGaInNPAsSb}$ . Рассматриваемая восьмикомпонентная система дает возможность получать варизонные слои с шириной запрещённой зоны от 6,4 эВ ( $\text{AlN}$ ) до 0,18 эВ ( $\text{InSb}$ ) [1]–[6] (рис. 1) с любым набором гетерогенных или гомогенных макро- или микросветоизлучающих или светопоглощающих структур, пригодных как для классических и квантовых оптоэлектронных преобразований, так и для аккумуляции энергии [7]. При этом используется весь спектр электромагнитного излучения Солнца, которое эффективно поглощается в варизонных гетероэпитаксиальных слоях или квантовых точках (оптимальные каналы схематически обозначены на рис. 2).

На основе структур с переменной шириной запрещённой зоны представляется возможным реализовать функциональные элементы последовательного и параллельного типа, в которых преобразования сигналов происходят в микро-, нанообластях твердых растворов порядка диффузионной длины носителей заряда. В одной монолитной структуре излучателей, фотоприёмников, передающих сред и аккумуляторов энергии, которые легко реализуются на многокомпонентных твердых растворах  $\text{A}^3\text{B}^5$  [8], открываются перспективы комплексной микроминиатюризации оптоэлектронных устройств на одном чипе. Технологическая гибкость многокомпонентных материалов в сочетании с нанотемплетными (согласующими параметрами решёток) слоями облегчают решение проблемы совмещения кремний-транзисторных микроструктур с соединениями  $\text{A}^3\text{B}^5$ , и создания на их основе функциональных элементов, сочетающих достижения микро-, оптоэлектроники [1] для эффективных сред квантовых компьютеров, работающих при физиологических температурах [9].

## II. МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ И ЭНЕРГИИ

Применение нанотемплетных слоёв получения ненапряжённых гетерогенных твёрдых растворов без граничных состояний между гомогенными областями, соизмеримыми с длинами свободного пробега электронов, дырок и фотонов, открывает перспективы применения многокомпонентных твёрдых растворов в качестве запоминающих сред, в



которых возможны как хранение, так и обработка информации и энергии [10]. Гетероструктуры в энекторных оптических системах обычно выполняются с широкозонным окном, имеют широкую область спектральной чувствительности, могут иметь элементы усиления, например, лавинного, транзисторного и т.д. В лавинном режиме коэффициент умножения составляет от единиц до сотен. Более высокой спектральной чувствительностью обладают структуры фотодиодов с *i*-областью. В этом случае уменьшаются темновой ток и ёмкость фотодиода. При использовании в качестве *n*-области слоя GaInAsP с  $N_d \sim (1...2) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  общая ёмкость фотодиода размером 150 мкм составляет меньше 0,8 пФ при сравнительно низком обратном напряжении, равном 20 В, и обратном токе, меньшем  $3 \cdot 10^{-11}$  А. В таком режиме в максимуме спектральной чувствительности на длине волны 1,06 мкм квантовый выход равнялся 70 % [10].

Одним из методов повышения квантовой эффективности фотодиодов является создание отражающего покрытия, которое увеличивает коэффициент сбора света структурой. В структурах GaInAsP/InP в качестве отражающего покрытия в фотодиодных структурах с двойным гетеропереходом использовалась анодно-окисленная поверхность обратной стороны подложки InP. Анодно-окисленная плёнка значительно легче формируется, чем обычно осаждаемые плёнки SiO<sub>2</sub> или Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. Максимум квантовой эффективности после проведения окисления составляет 82%, в то время как без окисления – 64%, увеличение эффективности составляет 18 %.

Приведём примеры реализации некоторых гетероструктур для преобразования лучистой солнечной энергии в электрическую. Лавинный фотодиод на гетероструктуре с изорешётчным твёрдым раствором AlGaAsSb, выращенном на подложке GaSb, имел коэффициент умножения ~50 на длине волны 1,3 мкм. В данном материале коэффициенты ионизации дырок больше, чем коэффициенты ионизации электронов.

При освещении со стороны подложки через слой с убывающей от подложки к *p-n*-переходу шириной запрещённой зоны наблюдается узкая полоса спектральной чувствительности, обусловленная селективными свойствами фотоэффекта в полупроводниках с переменной шириной запрещённой зоны. Обратное смещение даёт увеличение эффективности солнечной батареи примерно в 3 раза (рис. 3).

Структура типа *p-InP-p-GaInAsP-n-GaInAsP-n-InP* [10] имела область спектральной чувствительности 0,9...1,4 мкм. Из-за сильного влияния дефектов на поверхности раздела InP—GaInAsP темновой ток был большим ( $10^{-2}$  А/см<sup>2</sup>). При расположении области пространственного заряда в слое фосфида индия в структуре *p<sup>+</sup>-InP-n-InP-n-GaInAsP-n-InP* достигается коэффициент лавинного умножения 3000 при плотности темнового тока менее  $10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>. Коэффициенты лавинного умножения

электронов  $\alpha$  и дырок  $\beta$  значительно зависят от соотношения коэффициентов ионизации для разных составов. Для указанного состава  $\alpha/\beta = 3...4$ .

В гетероструктурах *p-GaSb-n-GaAsSb* полоса спектральной чувствительности лежит в диапазоне 1,0...1,7 мкм. Внешняя квантовая эффективность  $\eta_e = 0,4$  при нулевом смещении и достигает 0,6 вблизи 1,3 мкм при обратном смещении 1 В. Величина обратных токов составляет 0,1 мА при смещении 3 В.

В лавинной гетероструктуре на этой системе твёрдых растворов эпитаксиальные слои, образующие *p-n*-гетеропереход, *n-Ga<sub>0,8</sub>Al<sub>0,2</sub>Sb-p<sup>+</sup>-Ga<sub>0,5</sub>Al<sub>0,5</sub>Sb*, выращены на подложке GaSb с проводимостью *n*-типа. Структура освещается со стороны широкозонного *p<sup>+</sup>*-слоя, а область объёмного заряда *p-n*-перехода и соответственно область умножения смещены в *n*-слой твёрдого раствора. Без применения просветляющего покрытия внешняя квантовая эффективность  $\eta_e = 0,7$  и коэффициент лавинного умножения  $M = 12$ .

Для измерения области спектральной чувствительности широкозонный *p<sup>+</sup>*-слой изготавливается из состава Ga<sub>0,5</sub>Al<sub>0,5</sub>Sb или из четверного твёрдого раствора Ga<sub>0,5</sub>Al<sub>0,5</sub>As<sub>0,1</sub>Sb<sub>0,9</sub>. В зависимости от разности ширины запрещённых зон в активном *n*-слое и широкозонном *p*-слое, которые определяются содержанием алюминия, спектральный диапазон чувствительности охватывает область 1,0...1,1 или 1,0...1,4 мкм. Внутренняя квантовая эффективность составляет 0,9, внешняя – 0,6 на длине волны 1,06 мкм и, как показывают расчёты, может приближаться к единице при использовании антиотражающего покрытия. Малый темновой ток ( $I \approx 10$  нА) в режиме лавинного усиления ( $M \approx 20$  при  $U_{обр} = 20$  В), высокая квантовая эффективность ( $\eta \approx 1$ ) делают лавинные структуры на основе GaAlSb конкурентоспособными с германиевыми лавинными солнечными батареями.

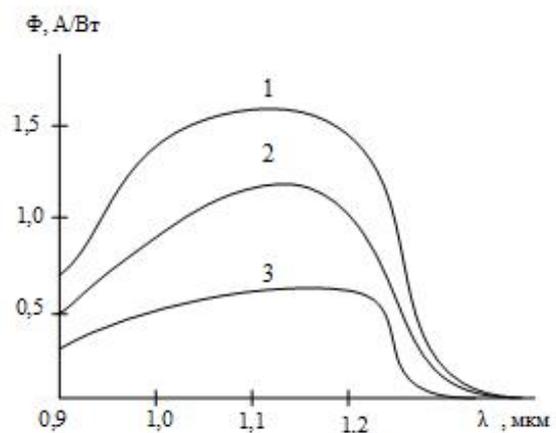


Рис. 3 Спектры фоточувствительности гетероструктуры на основе GaInAsP-InP при обратных смещениях  $U_{обр} = -30$  (1),  $-15$  (2) и 0 В (3)

Дальнейшее расширение спектральной чувствительности достигается использованием твёрдых растворов арсенида галлия-индия. В этой системе разработаны структуры с *p-n*-переходом *p-InP-n-Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As*, *p-n*-гомопереходом *n-Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As-p-Ga<sub>0,5</sub>In<sub>0,5</sub>As*, и *p-n*-гетеропереходом *p-Ga<sub>0,8</sub>In<sub>0,2</sub>As-n-Ga<sub>0,8</sub>In<sub>0,2</sub>As*. В качестве подложек использовался фосфид индия. Область спектральной чувствительности гетероструктур расширяется до 1,6 мкм с квантовой чувствительностью в максимуме ( $\lambda = 1,0$  мкм)  $\eta = 0,6$ . Обратный ток при смещении 0,5 В составляет 20 мкА.

При освещении со стороны подложки из фосфида индия область спектральной чувствительности доходит до 1,7 мкм. При освещении со стороны эпитаксиального слоя длинноволновая граница фоточувствительности расширяется до 1,80 мкм, а коротковолновый спад чувствительности простирается в видимую область спектра ( $\lambda < 0,8$  мкм). Внешняя квантовая эффективность в максимуме спектральной чувствительности достигает 0,7. Плотность темнового тока при смещении 0,5 составляет  $2 \cdot 10^{-5}$  А/см<sup>2</sup>. Коэффициент лавинного умножения равен 100 при смещении  $U = 21$  В.

### III. ОПТИМИЗАЦИЯ СВЕТОВОГО ПОТОКА И ОМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ КОНТАКТОВ В ВАРИЗОННЫХ ЭНЕСТОРАХ-ЗОНИСТОРАХ

В качестве примера рассмотрим оптоэлектронный преобразователь с градиентом ширины запрещённой зоны, направленным по оси *z*, перпендикулярной плоскости *xу*, на которую проектируется непрерывное изображение с изменяющейся вдоль оси *x* по синусоидальному закону интенсивностью светового потока  $\Phi$  [10]. Считая, что в выходной плоскости закон изменения интенсивностей сохраняется, передаточную функцию можно записать через контрасты входной  $K_1$  и выходной  $K_2$  плоскостей в виде:

$$H(f_x, f_y) = \frac{R_3(f_x)}{R_1(f_x)} = \frac{\Phi_{3\max} - \Phi_{3\min}}{\Phi_{3\max} + \Phi_{3\min}} \times$$

$$\times \frac{\Phi_{1\max} + \Phi_{1\min}}{\Phi_{1\max} - \Phi_{1\min}} = \frac{K^- (\Phi_{\max} - \Phi_{\min})}{K^+ (\Phi_{\max} + \Phi_{\min})}$$

Здесь

$$K^- (\Phi_{\max} - \Phi_{\min}) = \frac{\Phi_{3\max} - \Phi_{3\min}}{\Phi_{1\max} - \Phi_{1\min}},$$

$$K^+ (\Phi_{\max} + \Phi_{\min}) = \frac{\Phi_{3\max} + \Phi_{3\min}}{\Phi_{1\max} + \Phi_{1\min}}$$

представляют собой коэффициенты передачи светового потока при вычитании и сложении максимальной и минимальной интенсивностей соответственно. Если для простоты предположить, что квантовые выходы во входной и выходной

плоскостях равны единице по всей поверхности, передаточная функция определяется диффузионно-дрейфовым переносом неосновных носителей через слой переменного состава (рис. 4). При этом целесообразно применять композиционную оптимизацию сопротивления контактов от широкозонных слоёв до металлических контактов (рис. 5).

В пределе любой кристалл гетерогенного полупроводника с эффективной излучательной рекомбинацией и генерацией носителей можно представить множеством неупорядоченных оптоэлектронных микроструктур с оптическими и электрическими связями [10]. Определяя пространственные распределения коэффициента передачи, можно синтезировать передаточные функции гетерогенных полупроводников как перспективных оптоэлектронных сред для солнечных батарей.

Принципиальным преимуществом преобразования потока фотонов в электрический ток в слоях с градиентом запрещённой зоны является возможность преобразования сигналов в реальном масштабе времени, т. е. практически мгновенно, за время  $\sim 10^9 \dots 10^8$  с.

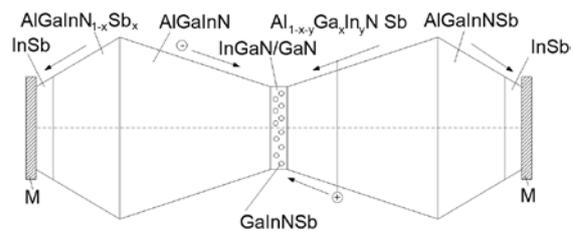


Рис. 4 Бездефектная эпитаксиальная варизонная система приборных гетероструктур и их омических контактов, М – металлический контакт

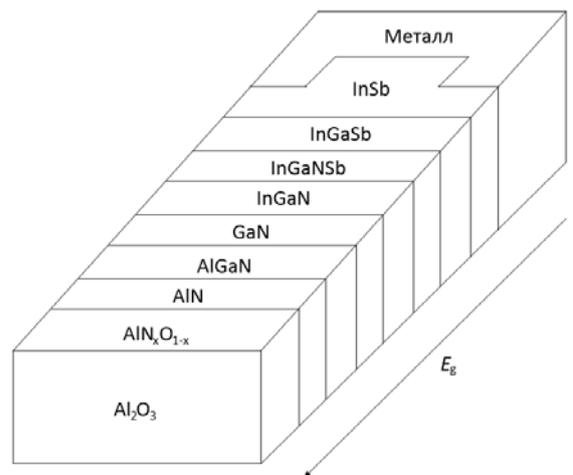


Рис. 5 Многослойная варизонная гетероструктура низкоомных омических контактов снижает потери на 15...30 %



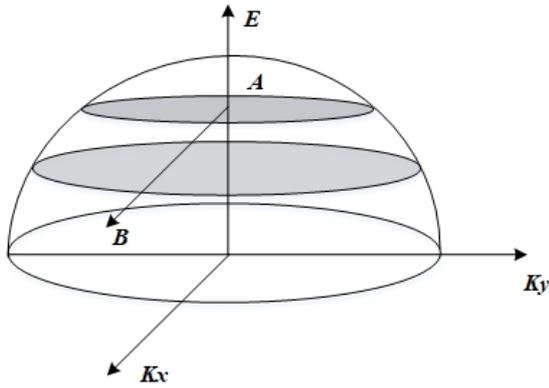


Рис. 6 2D и 3D распределения квантовых состояний в  $K$ -пространстве

Ряд задач накопления энергии, управления сложными системами, задачи метеорологии, математической физики можно решить только двумерной и трёхмерной обработкой информации и энергии в реальном масштабе времени. При этом требуется быстроедействие более  $10^6$  операций в секунду, которое невозможно реализовать в ЭВМ на транзисторных элементах. Лишь двумерные и трёхмерные системы обработки информации в реальном масштабе времени обеспечивают практически мгновенное преобразование больших массивов информации и энергии в виде пространственных изображений.

#### IV. РАССЯЕНИЕ, БЫСТРОДЕЙСТВИЕ И НАКОПЛЕНИЕ НОСИТЕЛЕЙ

Проблема увеличения быстрогодействия электронных компонентов носителей тока прямо или косвенно приводит к задачам, связанными необходимостью подавления какого-либо одного или нескольких механизмов рассеяния. При этом понижение размерности системы способствует подавлению рассеяния. В самом деле, при рассеянии на электронах, фононах и дефектах должны выполняться законы сохранения квазиимпульса и энергии. Так как некоторых значений этих величин в дискретном спектре низкоразмерных систем нет, соответствующие акты рассеяния могут быть запрещены. Кроме того, ограничивающим обстоятельством является и уменьшение плотности конечных состояний, в которые рассеивается частица.

Возможно частичное подавление рассеяния в тонкопленочных системах. Рассмотрим с этой точки зрения  $2D$ -систему, в которой по мере увеличения концентрации электронов будет увеличиваться число занимаемых подзон в  $E$ -пространстве и число заполненных слоёв в  $K$ -пространстве (рис. 6).

Еще одна возможность изменения процессов электрон-фононного взаимодействия при понижении размерности системы связана с изменением фононного спектра. Исследования показали, что захват электронов в квантовых ямах (КЯ) и локализация фононов могут существенно изменять

скорость электрон-фононного взаимодействия. Особенно большой вклад даёт рассеяние на фононных модах, обусловленных границами квантовой гетероструктуры.

Различная физическая природа захвата (локализации) электронов в КЯ и локализации (захвата) фононов позволяет реализовать структуры со смещением электронной КЯ относительно области локализации фононов и осуществить их раздельное квантование, что может радикально изменять электрон-фононное взаимодействие, в частности ослабить или даже устранить рассеяние электронов фононами на границах гетероструктуры.

#### V. ВЫВОД НАКОПЛЕННОЙ ЭНЕРГИИ ИЗ ЭНЕСТОРА-ЗОНИСТОРА

Проблема вывода и дальнейшего использования накопленной энергии зависит от параметров потребителя. Оптимальные выходные параметры энестора будут тогда, когда параметры нагрузки согласованы с его параметрами. Рассмотрим примеры вывода энергии.

- 1) Электропроводность входа нагрузки должна равняться или превышать проводимость выхода энестора. Для этого больше всего подходит узкозонный слой варизонного контакта на основе  $\text{InSb}$  ( $E_g = 0,18$  эВ) (рис. 1, 5).
- 2) Удобным элементом для вывода энергии является графен, инкапсулированный в монослой  $\text{hBN}$ ,  $\text{AlCN}$ , или  $\text{AlN}$ .
- 3) Варизонный или гетерогенный слой с каналами суперпроводимости на квантовых куперовских парах электронов [11].

#### VI. РЕКТЕНА – НАНОАНТЕННЫЙ КВАНТОВЫЙ СВЧ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК [12], [13]

Падающий на антенну свет вызывает в ней колебания электронов. Движение электронов создаёт переменный ток в цепи антенны. Чтобы преобразовать переменный ток в постоянный, его детектируют с помощью выпрямляющих диодов. После преобразования постоянный ток можно использовать для питания внешней нагрузки. Резонансная частота антенны (частота, на которой система имеет самый низкий импеданс и, следовательно, высокую эффективность) растёт линейно с физическими размерами антенны в соответствии с простой теорией антенн СВЧ. Наибольшая интенсивность солнечного излучения лежит в диапазоне длины волн солнечного спектра, примерно от 0,3 до 2,0 мкм. Таким образом, для того, чтобы выпрямляющая антенна была эффективным электромагнитным накопителем солнечного света, она должна иметь элементы размером порядка сотен нанометров.

В современных устройствах наномантенн обычно используются диоды Шоттки, туннельные диоды с диэлектрическими нанослоями или переходы металл-полупроводник-металл (МПМ). Перспектив-



но применение широкозонных полупроводников типа AlN или BN. В отличие от диодов Шоттки, МПМ-диоды не имеют паразитных ёмкостей, потому что они работают на основе электронного туннелирования. Благодаря этому МПМ-диоды эффективны на частотах около 180 ТГц, что близко к оптимальным частотам наноприемников. Выпрямляющие элементы антенны удобно изготавливать в нанопористой структуре методами селективной эпитаксии гетероструктур системы BaAlGaInNPAsSb, в которой имеется необходимый набор параметров нанослоев для получения терагерцового выпрямления (рис. 7).

**Изготовление наноприемников.** Для обеспечения необходимых размеров наноприемников требуется использование электронно-лучевой литографии, рентгеновской литографии или других способов получения сверхвысокого разрешения. Эти способы, как правило, очень медленные, дорогие, что не всегда целесообразно при изготовлении наноприемников. Однако, в связи с последними достижениями в литографии, а именно с её высоким разрешением и развитием рулонной технологии полимерных пленок (процесс создания электронных устройств на гибком пластике или металлической фольге) малая стоимость производства теперь кажется достижимой.

Антенна представляет собой выделенную площадку кремния определённой формы, размером 200 на 200 и на 500 нанометров. Её основной особенностью является то, что угол отражения света зависит от интенсивности падающего на луча.

В результате получим два элемента в вертикальной плоскости антенны (рис. 7) [1]. В зависимости от толщины слоя на один уровень при современных технологиях может приходиться от двух до 4 слоёв. Например, в трёхслойном варианте реализации пирамидальных уровней, 8-слойная эпитаксия позволяет сформировать 2-элементную сетку по вертикали. В случае полуволнового шага элементов решётки в вертикальной плоскости при

частоте излучения 100 ТГц толщина уровня пирамиды должна быть 1,5 мкм, при 3-слойной эпитаксии допустимая толщина одного слоя топологии наносхемы 500 нм. Выполнение этого требования при нынешнем уровне развития технологий не является сложным. В заключение следует указать на возможность применения разнотипных уровней наноприемников, отличающихся по количеству слоёв. При этом в обработке сигналов следует учитывать неравномерный характер антенных решёток или пытаться выдержать одинаковое расстояние между их элементами за счёт расширения наноприемников в различных слоях смежных и пирамидальных уровней.

Рассматривая перспективы развития конструкторско-технологических решений по наноприемникам для солнечной энергетики необходимо развивать многослойные эпитаксиальные технологии систем элементов на чипе в диапазонах от десятков ГГц до сотен ТГц. Следует максимально использовать трёхмерные топологии 4-8-слойных наноприемников начиная с двухуровневых пирамидальных технологий, получаемых многослойной эпитаксией гетерогенных наноструктур бездефектных материалов  $A^3B^5$ .

Предполагается большой экономический эффект от внедрения наноприемников. Так, например, по сравнению с кремниевыми фотоэлементами, стоимость одного квадратного метра материалов для наноприемников на два порядка ниже (кремниевые – \$ 1000, альтернатива – от \$ 5 до \$ 10).

Таким образом, можно констатировать, что солнечную энергетику ждет мощный прорыв: материалы, применяемые для создания гибридных наноприемников, стоят от \$ 5 до \$ 11 за квадратный метр. При этом последняя цифра касается золотых наноприемников. Напомним, что в случае  $Si/A^3B^5$  фотоэлементов стоимость приближается к примерно \$300...500 из них \$ ~200 «уходят» на полупроводники.

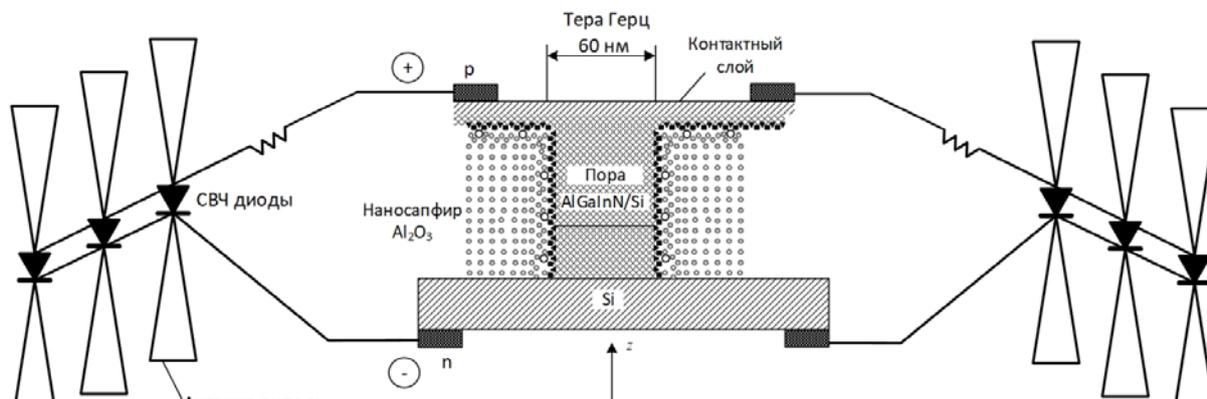


Рис. 7 Фрагмент наноприемника-ректены с интегральной системой выпрямления на диодах в нанопорах анодного оксида алюминия на кремнии

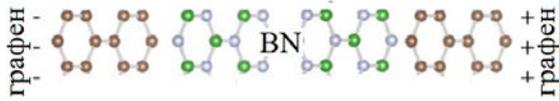


Рис. 8 Суперконденсаторы на графене, инкапсулированном в гексагональный нитрид бора (h-BN)

С большой вероятностью можно утверждать, что в будущем наноматериалы смогут питать электромобили, заряжать мобильные телефоны, поставлять электроэнергию домам, а кремниевые солнечные батареи, которые используются сегодня, станут пережитком прошлого.

### VII. СУПЕРКОНДЕНСАТОРЫ НА ГРАФЕНЕ, III-НИТРИДАХ И САПФИРЕ ДЛЯ СЛОЕВ АКУМУЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ЭНЕСТОРОВ

Как перспективные элементы накопления энергии от солнечных элементов для энесторов (рис.1), рассмотрим суперконденсаторы [9]. В последнее время большое внимание уделяется уменьшению толщины диэлектриков и идентификации новых систем графеноподобных 2D материалов с высокой диэлектрической проницаемостью (и, следовательно, ёмкостью). К сожалению, эксперименты и расчёты показали, что во многих тонких пленках материалов с высокой диэлектрической проницаемостью (например,  $\text{SrTiO}_3$ ) значения ёмкости уменьшаются с уменьшением толщины [14], [15]. В то же время экспериментально и теоретически показано, что относительная диэлектрическая проницаемость тонких плёнок h-BN может быть почти в 2 раза выше, по сравнению с объёмным нитридом бора [16]. Экспериментально также было продемонстрировано увеличение диэлектрической проницаемости плёнок h-BN в различных структурных сочетаниях с графеном. Было выявлено значительное (более 100%) увеличение ёмкости при толщине  $\sim 5$  нм по сравнению с классической формулой. Это используется в суперконденсаторах, изготовленных из графена, инкапсулированные в гексагональный нитрид бора (h-BN) (рис. 8).

Нанокарбонитриды также имеют потенциальные возможности применения в энергетических устройствах, таких как суперконденсаторы, топливные элементы и батареи. Бор (алюминий), углерод и азот тоже могут быть атомарно смешанные с образованием различных полупроводниковых гексагональных слоёв с разной стехиометрией [6]. До сих пор известна только одна попытка экспериментального синтеза графеноподобных AlN слоёв, с использованием (111) Ag подложки [17].

Для формирования оптимальных нанотемплетов, как было установлено нами в ходе исследований упрощенной модели процесса зарождения дефектов, при радиусах нанобразований меньших критического, бездислокационность может быть достигнута при любой толщине нанотемплета. В этом случае кривые условно бездислокационного рельефа доминируются трёхмерными ограничительными эффектами. То есть, даже при больших степенях

различия решеток малодислокационность может быть обеспечена критическим радиусом пор  $R_c \leq 10$  нм, глубина их при этом не имеет принципиального значения и может быть любой, в отличие от тонкопленочного варианта буферного слоя согласования, где критическая толщина, которая обеспечивает напряжённость и бездислокационность структуры, строго ограничена по величине согласно критерия Месьюс-Блекесли [18]. Для темплетов АОА формирование пор радиусом  $R_c \leq 10$  нм связано с определенными трудностями, однако при исследованиях и разработке режимов МОС-гидридной эпитаксии слоев нитрида галлия на подложках сапфира было выявлено, что в процессе обработки сапфира в потоке аммиака (в литературе этот процесс обычно называется «нитридизацией сапфира») на поверхности при определённых режимах образуются нанопоры именно такого,  $R_c \leq 10$  нм, радиуса, то есть, сапфир становится нанотекстурованным (рис. 9).

Нами исследовался наноструктурированный сапфир при различных условиях эпитаксиального роста AlN, на котором впервые получена аномально высокая электропроводность с полупроводниковым характером температурной зависимости. Это может быть вызвано самоформированием шестигранников графена, образованием шестигранников гексагональной решётки нитрида алюминия или карбонитрида. В процессе исследования установлено активирующее влияние температурной обработки поверхности сапфира в потоке аммиака при дальнейшем формировании на нанотекстурованном сапфире нанокарбидных структур в потоке триметил алюминия. В диапазоне температур  $T = 250 \dots 1200$  °C пиролиз триметил алюминия (ТМА) вызывает нанокарбидизацию сапфира и образование различных вариантов нанокарбидов в нанопорах текстурованного сапфира. Полученный нанокарбидизованный сапфир, может быть совокупностью консолидированных образований графена и фаз подобных  $\text{Al}_4\text{C}_3$  и AlCN (рис. 9).

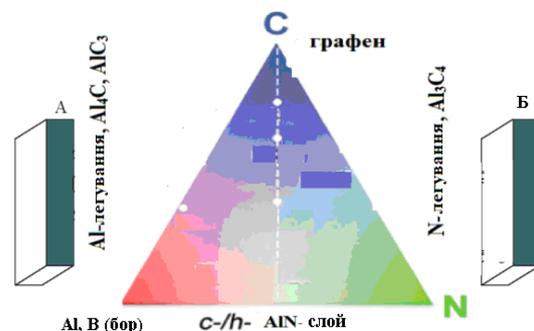


Рис. 9 Возможности создания консолидированных элементов графена и фаз AlCN (BCN) в реакторе МОС-эпитаксии в потоке ТМА (ТЭВ) на поверхности нанотекстурованного сапфира; А, В – контакты системы суперконденсатора



Таким образом, в плане исследований нанокристаллических процессов при *MOCVD*-эпитаксии III-нитрид на нанотемплатах сапфира экспериментально определены термодинамические параметры (температура, давление) и прекурсоры, при которых реализуется самоформирование консолидированных нанокристаллов для слоев аккумуляции энергии, на базе которых на сегодняшний день в НИИ Микроприборов НАНУ продолжают исследования по отработке и доведению до промышленного образца технологии суперконденсатора, интегрированного в чипе энестора.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По совокупности технических и экономических параметров широкое распространение и перспективность имеют следующие методы:

- 1) Фотоэлектрический эффект в полупроводниках, особенно гетерогенных.
- 2) Выпрямляющие наноприборы (ректены).
- 3) Квантовые энесторы.
- 4) Суперконденсаторы на графене, полученном эпитаксией.

Приведенные исследования и практические разработки продемонстрировали большие возможности зонисторных гетерогенных структур на тринитридах для высокоэффективного преобразования и накопления энергии солнечного излучения (табл. 1). Разработанная газофазная технология селективной эпитаксии позволяет получать бездефектные гетероструктуры на подложках кремния, что обеспечивает высокий квантовый выход преобразования всего широкого спектра излучения солнца в электрический ток и накопление его энергии в одной интегральной структуре энестора.

ТАБЛИЦА 1 ПАРАМЕТРЫ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ И НАКОПИТЕЛЕЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Методы преобразования и накопления	Параметры		
	Эффективность, %	Накопление, Вт/ч*	Стоимость (цена 1 кВт/ч)**
Солнечные батареи на Si	23 (теор.33%)	1	100 ед**
Солнечные преобразователи на гетерогенных полупроводниках	> 90 (теор. 93...100)	4	15
Выпрямляющие антенны (ректены)	85	5	30
Квантовые энесторы	99 (200)	10	5
1. Потенциальные ямы, квантовые точки	98	25	10
2. Усиление тока, управление процессором	150...250	5	20
3. Квантовая оптимизация передачи энергии	80	50	5
4. Расширение поглощения излучения Солнца	100	3	30
5. Бездефектные слои	100	20	10
6. Терагерцовые ректены	80	40	25

7. Суперконденсаторы	100	75	20
8. 3D поглощение солнечного излучения	95	7	50

\* - единица площади  
\*\* - условная единица  
пп. 1-8 - экспертная оценка

Высокий квантовый выход фотоэлектрического эффекта в наноструктурах твердых растворов системы  $\text{BaGaInNPAsSb}$  компенсирует технологические затраты и существенно изменяет саму парадигму не только обеспечения энергией электронных функциональных устройств, но и делает принципиально возможным развитие нового перспективного энергетического ресурса для многих применений. Однако остаётся поставить ещё несколько потенциально наиболее интересных экспериментов и практических разработок. Перечислим направления научных и практических работ.

- 1) Разработка промышленной технологии селективных интегральных преобразователей и накопителей энергии Солнца для лучей и рассеянного света.
- 2) В настоящее время нет однозначного теоретического объяснения высокой эффективности передачи электрической энергии в селективных наноструктурах  $\text{A}^3\text{B}^5/\text{Si}$ .
- 3) До сих пор нет промышленных систем для нанопитакии восьмикомпонентных твердых растворов в нанопорах  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Si}$ .
- 4) Разработка методов и твердотельных структур передачи значительных количеств энергии спонтанным и когерентным (лазерным) излучением внутри интегральных чипов и между ними.
- 5) Мало изучена растворимость восьмикомпонентной системы твердых растворов в различных термодинамических условиях, особенно в плазме.

#### ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

- [1] I. V. Masol, V. I. Osinskii, and O. T. Sergiev, *Informatsionnyie nanotekhnologii [Information nanotechnology]*. Kyiv: Makros, 2011, ISBN: 978-966-2022-39-1.
- [2] S. R. Lee, A. F. Wright, M. H. Crawford, G. A. Petersen, J. Han, and R. M. Biefeld, "The band-gap bowing of  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  alloys," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, no. 22, pp. 3344–3346, May 1999, DOI: [10.1063/1.123339](https://doi.org/10.1063/1.123339).
- [3] A. Janotti, D. Segev, and C. G. Van de Walle, "Effects of cation d states on the structural and electronic properties of III-nitride and II-oxide wide-band-gap semiconductors," *Phys. Rev. B*, vol. 74, no. 4, p. 045202, Jul. 2006, DOI: [10.1103/PhysRevB.74.045202](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.74.045202).
- [4] P. Rinke, M. Winkelkemper, A. Qteish, D. Bimberg, J. Neugebauer, and M. Scheffler, "Consistent set of band parameters for the group-III nitrides AlN, GaN, and InN," *Phys. Rev. B*, vol. 77, no. 7, p. 075202, Feb. 2008, DOI: [10.1103/PhysRevB.77.075202](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.77.075202).
- [5] G. A. Slack, L. J. Schowalter, D. Morelli, and J. A. Freitas, "Some effects of oxygen impurities on AlN and GaN," *J. Cryst. Growth*, vol. 246, no. 3–4, pp. 287–298, Dec. 2002, DOI: [10.1016/S0022-0248\(02\)01753-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)01753-0).
- [6] H. Tanimura, J. Kanasaki, and K. Tanimura, "Ultrafast scattering processes of hot electrons in InSb studied by time- and angle-



- resolved photoemission spectroscopy,” *Phys. Rev. B*, vol. 91, no. 4, p. 045201, Jan. 2015, DOI: [10.1103/PhysRevB.91.045201](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.91.045201).
- [7] V. I. Osinskii *et al.*, “Nakoplenie fotonositeley v enestorah na heterogenykh mnogokomponentnykh III-nitridah [Accumulation of photocarriers in enestors on heterogeneous multicomponent III-nitrides],” in *V International Conference “Nanostructured Materials - 2016,”* 2016.
- [8] V. Osinsky, A. Osinsky, and R. Miller, “AlInGaNaSP alloy for LED and laser applications,” in *LED 50 th Anniversary Symposium*, 2012.
- [9] V. Osinsky, “Some technology aspects for quantum enestor through AIII BV multicomponent nanoepitaxy,” *Semicond. Phys. Quantum Electron. Optoelectron.*, vol. 20, no. 2, pp. 254–258, Jul. 2017, DOI: [10.15407/spqeo20.02.254](https://doi.org/10.15407/spqeo20.02.254).
- [10] V. I. Osinskii, V. I. Privalov, and O. Y. Tikhonenko, *Optoelektronnye struktury na mnogokomponentnykh poluprovodnikah [Optoelectronic structures on multicomponent semiconductors]*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1981.
- [11] P. N. Prasad, *Nanophotonics*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004, ISBN: 0471649880.
- [12] “Nanoanteny dlia otrymannia soniachnoi enerhii [Nano-antennas for solar energy].” [Online]. Available: <http://www.magey.com.ua/energetika/397-nanoanteny-dlia-otrimannja-soniachnoi-enerhii>.
- [13] A. E. Krasnok *et al.*, “Optical nanoantennas,” *Uspekhi Fiz. Nauk*, vol. 183, no. 6, pp. 561–589, 2013, DOI: [10.3367/UFNr.0183.201306a.0561](https://doi.org/10.3367/UFNr.0183.201306a.0561).
- [14] M. Stengel and N. A. Spaldin, “Origin of the dielectric dead layer in nanoscale capacitors,” *Nature*, vol. 443, no. 7112, pp. 679–682, Oct. 2006, DOI: [10.1038/nature05148](https://doi.org/10.1038/nature05148).
- [15] M. M. Saad, P. Baxter, R. M. Bowman, J. M. Gregg, F. D. Morrison, and J. F. Scott, “Intrinsic dielectric response in ferroelectric nano-capacitors,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 16, no. 41, pp. L451–L456, Oct. 2004, DOI: [10.1088/0953-8984/16/41/L04](https://doi.org/10.1088/0953-8984/16/41/L04).
- [16] G. Shi *et al.*, “Boron Nitride–Graphene Nanocapacitor and the Origins of Anomalous Size-Dependent Increase of Capacitance,” *Nano Lett.*, vol. 14, no. 4, pp. 1739–1744, Apr. 2014, DOI: [10.1021/nl4037824](https://doi.org/10.1021/nl4037824).
- [17] P. Tsipas *et al.*, “Evidence for graphite-like hexagonal AlN nanosheets epitaxially grown on single crystal Ag(111),” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 103, no. 25, p. 251605, Dec. 2013, DOI: [10.1063/1.4851239](https://doi.org/10.1063/1.4851239).
- [18] V. I. Osinskii, N. N. Liakhova, I. V. Masol, and N. O. Sukhovii, “Nanokarbidnye processy pri MOS-epitaksii III-nitridnykh struktur [Nanocarbide processes in MOS-epitaxy of III-nitride structures],” *Opt. informatsiino-enerhetychni tekhnologii*, vol. 1, p. 62–72, 2012.

Надійшла до редакції 02 травня 2018 р.

УДК 621.38(075.8)

## Рекордна ефективність сонячних батарей на варізонних трінітридах квантових енесторів-зоністорів

Осінський<sup>f</sup> А. В., к.т.н., ORCID [0000-0001-9532-5593](https://orcid.org/0000-0001-9532-5593)

e-mail [andrei.osinsky@agnitron.com](mailto:andrei.osinsky@agnitron.com)

Agnitron Technology

Уден Прайрей, МН, США

Дягілев<sup>f</sup> О. В., ORCID [0000-0002-9108-1576](https://orcid.org/0000-0002-9108-1576)

e-mail [diagilev.av@gmail.com](mailto:diagilev.av@gmail.com)

Борисов О. В., к.т.н. проф., ORCID [0000-0003-4553-3591](https://orcid.org/0000-0003-4553-3591)

e-mail [a.borisov@kpi.ua](mailto:a.borisov@kpi.ua)

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Київ, Україна

Ляхова Н. Н., ORCID [0000-0001-5790-9432](https://orcid.org/0000-0001-5790-9432)

e-mail [lyahova.natalia.n@gmail.com](mailto:lyahova.natalia.n@gmail.com)

Оначенко М. С., ORCID [0000-0001-7489-5642](https://orcid.org/0000-0001-7489-5642)

e-mail [maximonachenko@gmail.com](mailto:maximonachenko@gmail.com)

Суховій Н. О., ORCID [0000-0002-8649-4536](https://orcid.org/0000-0002-8649-4536)

e-mail [ninaliakhova@gmail.com](mailto:ninaliakhova@gmail.com)

НДІ Мікроприладів НАН України

Київ, Україна



Масол І. В., к.т.н., ORCID [0000-0002-1262-7076](https://orcid.org/0000-0002-1262-7076)

e-mail [masol@rostok.ua](mailto:masol@rostok.ua)

Приватне Акціонерне Товариство «Компанія Росток»  
Київ, Україна

Осінський В. І., д.т.н. проф., ORCID [0000-0001-8965-7444](https://orcid.org/0000-0001-8965-7444)

e-mail [osinsky77@gmail.com](mailto:osinsky77@gmail.com)

НДІ Мікроприладів НАН України  
Київ, Україна

**Реферат**—Розроблена нова квантова оптимізація накопичення енергії випромінювання Сонця в енесторах на багатокомпонентних твердих розчинах  $A^3B^5$ :  $BAIGalnNPAsSb$ .

Розглядаються наступні методи збільшення ефективності сонячних батарей: 1. Накопичення носіїв у глибоких потенціальних ямах і квантових точках; 2. Посилення струму, кероване класичними кремній-транзисторними і квантовими процесорами; 3. Квантові обчислення оптимальних потоків електронів, які утворюють квантово-розмірні куперовские пари, аналогічно високотемпературній надпровідності; 4. Варізонне та гетерогенне розширення спектра поглинання випромінювання Сонця; 5. Бездефектні узгоджувальні темплетні гетерошари в селективній наноепітаксії; 6. Інтеграція випромінювання НВЧ терагерцових сигналів у нанопористих структурах ректен терагерцового діапазону; 7. Накопичення енергії в графенових суперконденсаторах, отриманих у самоорганізованих нанопорах  $Al_2O_3$ ; 8. Збільшення поглинання фотонів вертикальними стінками нанопор частково епітаксійно зарощеними основним матеріалом кремнієм або твердими розчинами  $A^3B^5$ .

Розроблені технології дають змогу істотно, в 2–5 разів, збільшити енергетичну ефективність сонячних батарей на Si / III-нітридних наноструктурах.

Бібл. 18, рис. 9, табл. 1.

**Ключові слова** — III-нітриди; сонячні батареї; гетерогенні тверді розчини  $A^3B^5$ ; накопичення енергії; енестори; зоністори; ректени

UDC 621.38(075.8)

# Record Efficiency of Solar Cells Based on Graded-Gap Trinitrides of Quantum Enestors-Zonistors

A. V. Osinsky<sup>f</sup>, PhD, ORCID [0000-0001-9532-5593](https://orcid.org/0000-0001-9532-5593)

e-mail [andrei.osinsky@agnitron.com](mailto:andrei.osinsky@agnitron.com)

Agnitron Technology  
Eden Prairie, MN, USA

A. V. Diaghilev<sup>f</sup>, ORCID [0000-0002-9108-1576](https://orcid.org/0000-0002-9108-1576)

e-mail [diagilev.av@gmail.com](mailto:diagilev.av@gmail.com)

O. V. Borysov, PhD Prof., ORCID [0000-0003-4553-3591](https://orcid.org/0000-0003-4553-3591)

e-mail [a.borisov@kpi.ua](mailto:a.borisov@kpi.ua)

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
Kyiv, Ukraine

N. N. Liakhova, ORCID [0000-0001-5790-9432](https://orcid.org/0000-0001-5790-9432)

e-mail [lyahova.natalia.n@gmail.com](mailto:lyahova.natalia.n@gmail.com)

M. S. Onachenko, ORCID [0000-0001-7489-5642](https://orcid.org/0000-0001-7489-5642)

e-mail [maximonachenko@gmail.com](mailto:maximonachenko@gmail.com)



N. O. Sukhovii, ORCID [0000-0002-8649-4536](https://orcid.org/0000-0002-8649-4536)

e-mail [ninaliakhova@gmail.com](mailto:ninaliakhova@gmail.com)

Research Institute of Microdevices of NAS of Ukraine  
Kyiv, Ukraine

I. V. Masol, PhD, ORCID [0000-0002-1262-7076](https://orcid.org/0000-0002-1262-7076)

e-mail [masol@rostok.ua](mailto:masol@rostok.ua)

Private Joint Stock Company "Rostok"  
Kyiv, Ukraine

V. I. Osinsky<sup>s</sup>, Dr.Sc.(Eng.) Prof., ORCID [0000-0001-8965-7444](https://orcid.org/0000-0001-8965-7444)

e-mail [osinsky77@gmail.com](mailto:osinsky77@gmail.com)

Research Institute of Microdevices of NAS of Ukraine  
Kyiv, Ukraine

**Abstract**—This paper discusses the use of solid solutions of multicomponent semiconductors for solar energy converted and storage devices in some structural and technological formation options suitable for monolithic integration. The eight-component system under consideration makes it possible to obtain varizon layers from  $E_g = 6.4$  eV (AlN) to  $E_g = 0.18$  eV (InSb) with any set of heterogeneous macro-, micro- and nanosized LED (laser) structures, which allows conduct classical sequential and parallel electronic and optical processing of information, and convert photon fluxes into electric current and accumulate electrical energy in potential wells in the same chip. In this case, the entire spectrum of solar electromagnetic radiation from 200 nm (ultraviolet) to infrared radiation of 12000 nm is used, which is effectively absorbed in the gap layer practically without loss of energy transfer to one or several narrow-band regions specially created by the program in the epitaxy of the varizon layers.

The article analyzes examples of the implementation of some heterostructures for converting solar energy into electrical energy, such as AlGaAsSb / GaSb and GaInAsP / InP. The options for optimizing the luminous flux and resistance of contacts in graded-gap construction are considered using the example of an optoelectronic converter. The constructive use of rektenna for energy conversion is considered. The possibilities of using III-nitrides and nanocarbonitrides for energy storage layers of enestors are analyzed. For the formation of optimal nano-templates, as it was established in the course of studies of a simplified model of the process of defect formation, with radii of nano-creations of less critical, dislocation can be achieved with any thickness of the nanotemple. In this case, the curves of the conditionally dislocation-free relief are dominated by three-dimensional limiting effects.

Thus, thermodynamic parameters (temperature, pressure) and precursors were experimentally determined in terms of studies of nanocarbide processes in MOCVD epitaxy III-nitrides on nanoparticles of sapphire, in which self-formation of consolidated nanocarbides is realized for layers of energy accumulation on the basis of which, at the present time, the Research Institute of Micro Devices NASU continues research on working out and bringing to the industrial sample the technology of a super capacitor in an enestor chip.

These studies and practical developments have demonstrated the great potential of zonistor heterogeneous structures on Iii-nitrides for highly efficient transformation and accumulation of solar radiation energy. The developed gas-phase technology of selective epitaxy makes it possible to obtain defect-free heterostructures, which ensures a high quantum yield of conversion of the whole broad spectrum of solar radiation into electric current and accumulate its energy in one integrated structure. The high quantum yield of the photoelectric effect in nanostructures of solid solutions of the BaIGaInNPAsSb system compensates for technological costs and significantly changes the very paradigm of not only providing energy to electronic functional devices, but also makes it possible in principle to develop a new perspective energy resource for many applications.

Ref. 18, fig. 9, tabl. 1.

**Keywords** — III-nitrides; solar batteries; heterogeneous solid solutions A3B5; accumulation of energy; enestors; zonistors; rektens

