

---

---

## ОПТИЧНА І КВАНТОВА ЕЛЕКТРОНІКА В КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

---

---

УДК 004.032.84

В.И. ОСИНСКИЙ<sup>1,2</sup>, И.В. МАСОЛ<sup>3</sup>, М.С. ОНАЧЕНКО<sup>2</sup>, А.В. СУШИЙ<sup>2</sup>

### ДЕКОГЕРЕНТИЗАЦИЯ Ш-Н НИЗКОРАЗМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУР КВАНТОВЫХ ПРОЦЕССОРОВ

<sup>1</sup> *Национальный технический университет Украины «КПИ»,  
Проспект Победы, 37, г. Киев, Украина*

<sup>2</sup> *НИИ «Микроприборы» НАН Украины,  
ул. Северо-Сырецкая, 3, г. Киев, Украина*

<sup>3</sup> *Компания «Росток», г. Киев, Украина*

**Аннотация.** У роботі пропонується збільшення часу когерентного стану при кімнатних температурах використанням квантових точок всередині монокристалічної структури з великою шириною забороненої зони, зокрема, прямозонні матеріали нітриду галію або алюмінію, вирощених в нанореакторах анодного оксиду алюмінію або оксиду кремнію, отриманого в порах оксиду алюмінію. Наші результати показують ефективність застосування таких самоорганізованих структур з метою створення масивів квантових точок, стійких до процесів декогеренції. У порівнянні з іншими технологіями створення квантового комп'ютера, використання широкозонних прямозонні бездефектних матеріалів забезпечує роботу пристроїв при кімнатній температурі.

**Ключевые слова:** декогерентизация, квантовые точки, кубит, нитриды, самоорганизованные структуры.

**Анотация.** В работе предлагается увеличение времени когерентного состояния при комнатных температурах использованием квантовых точек внутри монокристаллической структуры с большой шириной запрещенной зоны, в частности, прямозонных материалов нитрида галлия или алюминия, выращенных в нанореакторах анодного оксида алюминия или оксида кремния, полученного в порах оксида алюминия. Наши результаты показывают эффективность применения таких самоорганизованных структур с целью создания массивов квантовых точек, устойчивых к процессам декогерентизации. В сравнении с другими технологиями создания квантового компьютера, использование широкозонных прямозонных бездефектных материалов обеспечивает работу устройств при комнатной температуре.

**Ключові слова:** декогерентизація, квантові точки, кубіт, нітриди, самоорганізовані структури.

**Abstract.** In the work proposes an increase in the time of the coherent state at room temperature by using quantum dots inside the single crystal structure with a large band gap, in particular, direct-gap materials or aluminum gallium nitride grown in nanoreactors anodic aluminum oxide or silicon oxide, resulting in the pores of alumina. Our results show the effectiveness of such self-organized structures in order to create arrays of quantum dots that are resistant to decoherence processes. In comparison with other technologies for building a quantum computer, the use of wide-band direct-gap materials provides defect-free operation of the devices at room temperature.

**Keywords:** decoherence, quantum dots, a qubit, nitrides, self-organized structures.

### ВВЕДЕНИЕ

Классические кремний-транзисторные компьютеры из-за последовательного принципа обработки сигналов не позволяют решать такие важные для современной цивилизации задачи, как поиск в неструктурированной базе данных, моделирование эволюции биологических систем и ядерных реакций, факторизации больших чисел и др. Последняя задача обеспечивает невозможность взлома современных шифров в конфиденциальных документах. Для расшифровки кодов требуется работа классического компьютера в течении нескольких лет проведения последовательных  $2^N$  операций. В квантовом компьютере реализуется квантовый параллелизм, т.е. вычисление происходит одновременно по  $2^N$  состояниям (где  $N$  – число квантовых битов-кубитов) [1]. Производительность квантового компьютера растет не линейно, а экспоненциально с увеличением количества элементов. Квантовый компьютер на 1000 кубитов будет превосходить самые мощные кремний-транзисторные суперкомпьютеры.

---

© В.И. ОСИНСКИЙ, И.В. МАСОЛ, М.С. ОНАЧЕНКО, А.В. СУШИЙ, 2014

На декогерентизацию квантовых точек в полупроводниках сильно влияет их окружение. Известно, что квантовые точки в стеклянной матрице или в коллоидном растворе сохраняют когерентность возбуждения из-за своей изолированности в составе кластеров. Однако в квантовых структурах, полученных в эпитаксиальных процессах из-за полевого или туннельного взаимодействия с дефектами и окружающими структурами происходит декогерентизация, которая разрушает кубиты информации, записанной в них [1]. В структурах разбавленных точек стеклянной матрицы электроны туннелируют на локальные уровни в стеклянной матрице из-за беспорядочной аморфной природы стекла. Хотя вероятность такого перехода мала, тем не менее этот процесс усиливается фононами. Происходит некогерентное туннелирование электронов из квантовой точки в окружающую ее структуру. Некогерентные безизлучательные переходы могут иметь место также на дефекты в самой квантовой точке или на состоянии на ее поверхности. Этим объясняется потемнение стекла с квантовыми точками после его сильного освещения фотонами лазера с энергией, большей порога поглощения. Совсем другая картина в квантовой точке внутри монокристаллической структуры с большой шириной запрещенной зоны, в частности, нитрида галлия или алюминия, полученных в нанореакторах анодного оксида алюминия или оксида кремния, полученного в порах его самоорганизованной маски (оксида алюминия) [2].

### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ

Рассмотрим две квантовые точки, разделенные туннельным барьером из широкозонного бездефектного полупроводника (AlGaN) (Рис. 1).

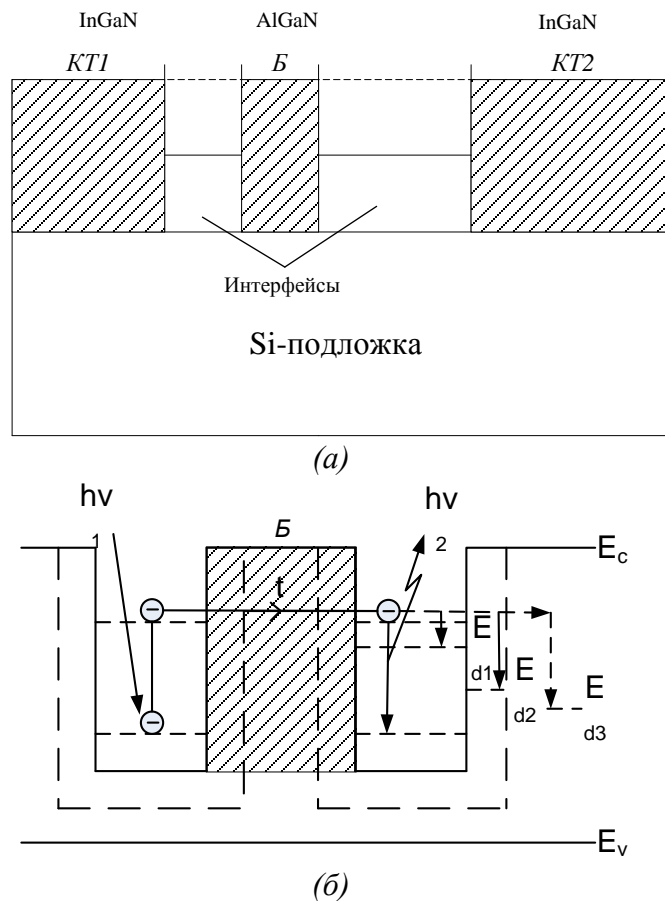


Рис. 1. Две квантовых точки InGaN (*KT1* и *KT2*) на поверхности подложки Si (*а*), между ними туннельно-прозрачный барьер *Б* из  $Al_2O_3$  или AlGaN. Потенциал двух квантовых точек (пунктиром обозначены потенциал при смещении, стрелка *t* показывает направление туннелирования из *KT1* в *KT2*;  $E_{d1}$ ,  $E_{d2}$ ,  $E_{d3}$  – уровни дефектов (ловушек) внутри квантовой точки, на ее интерфейсах и внутри внешней среды, соответственно) (*б*)

Кулоновское взаимодействие двух квантовых точек можно схематически описать двухуровневой моделью [3]. Один уровень соответствует самому нижнему состоянию одной частицы независимых

точек  $|1\rangle, |2\rangle$  соответствующим энергиям  $E_1, E_2$  и амплитуде туннелирования  $t$  между двумя точками. Эффективный гамильтониан одной из точек,

$$H = \mathcal{E}_1 |1\rangle\langle 1| + \mathcal{E}_2 |2\rangle\langle 2| + t |1\rangle\langle 2| + t^* |2\rangle\langle 1|,$$

где параметры обычно различные для электронов и дырок. Квантовые одночастичные волновые функции представляют собой сумму двух квантовых одночастичных волновых функций в двух точках,

$$\Psi_a(x) = \Psi_{a1}(x) + \Psi_{a2}(x), \quad (a = e, h)$$

Когда волновые функции независимых точек не пересекаются (все туннельные эффекты заключены в туннельном параметре  $t$  оператор биполярной поляризации в терминах волновых функций дается как

$$P = P_{CV} \int dx \Psi_e(x) \Psi_h(x) + h.c.,$$

$$P = P_{CV} \int dx \Psi_{e1}(x) \Psi_{h1}(x) + \Psi_{e2}(x) \Psi_{h2}(x) + h.c.$$

Для симметричных квантовых точек ( $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2$ ) имеется вырождение уровней, а соответствующий базис в теории возмущения дается симметричными и антисимметричными состояниями,

$$|s\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle + |2\rangle) \quad \text{и} \quad |a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle - |2\rangle)$$

Переменные энергии наименьшего порядка в параметрах  $t$  даются

$$E_s = \mathcal{E} - t; \quad E_a = \mathcal{E} + t$$

Параметр туннелирования нужно выбирать в соответствии с реальной структурой в реальном окружении. Гамильтониан является симметричным относительно двух точек, а основное состояние должно соответствовать этой симметрии. Легко видеть, что в этом приближении рекомбинация может происходить только если электрон и дырка находятся в одинаковом симметричном или антисимметричном состояниях. В этом случае диполем разрешены смешанные переходы.

Однако, симметрия приложенного электрического поля разрешает новые переходы.

Полная картина становится намного более сложной из-за электрон-дырочного кулоновского взаимодействия. Роль этого взаимодействия усиливается латеральным квантовым взаимодействием (Рис. 1, б) по сравнению с аналогичными проблемами квантовых ям. Бриант [4] провел расчеты в реальном пространстве кулоновского взаимодействия для асимметричной конфигурации. Для нитридов система квантовых точек состоит из слоев GaN/InGaN/AlGaIn. Были предприняты расчеты также для смещения, представленные на рис. 2 пунктирными линиями. Одновременно с волновыми функциями и их энергиями были также рассчитаны силы осцилляторов. Для фиксированных смещений числовые результаты (Рис. 2) показывают сильную зависимость силы осцилляторов основного состояния (нормализованные к площади  $L^2$ ) в латеральном направлении  $L$ .

Квантовые точки в беспорядочных матрицах стекла находятся в аморфной структуре с «мобильной» зоной. Край зоны мобильности разделяют делокализованные (мобильные) состояния, энергия которых больше, чем зона подвижности локализованных состояний внутри зоны. Мобильность носителей в локализованных состояниях возможна только с помощью поглощения или эмиссии фононов. Пространственно близкие состояния обычно далеко стоят друг от друга по энергиям. Через захват фононами этого препятствия, подвижность быстро уменьшается с понижением температуры. Локализованные состояния обуславливают быструю деструктивную интерференцию вызванную беспорядком. Для реальных аморфных материалов характерны структурные дефекты и дефекты из-за примесей.

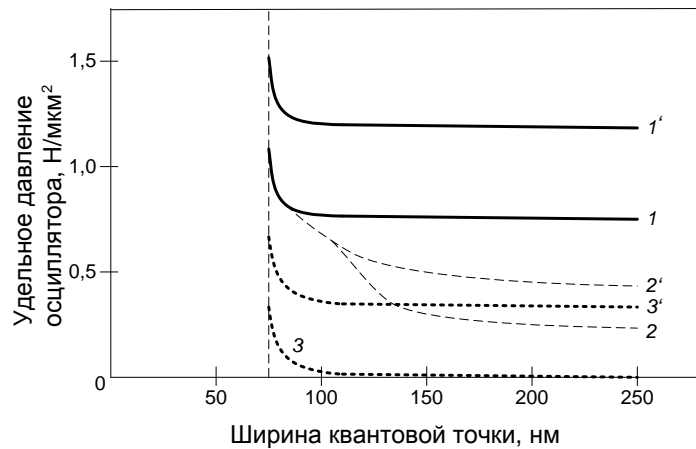


Рис. 2. Залежність сили осцилятора основного стану, нормалізованої по площі квантової точки від ширини КТ при смещеннях 0 мВ (1, 1'), 5 мВ (2, 2') и 10 мВ (3, 3'). 1, 2, 3 – КТ в порах Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 1', 2', 3' – КТ в порах SiO<sub>2</sub>

Носители, которые создаются из-за поглощения в квантовых точках, могут уйти из энергетических уровней дефектов, обуславливающих некогерентные переходы. Сначала они локализируются внутри квантовых точек ( $E_{d1}$ ), но обычно они диффундируют из них. При облучении лазером квантовые точки являются источниками носителей для окружающей среды (стекло), которые не поглощают в этой области спектра. Быстрые безизлучательные переходы могут быть на поверхностных состояниях ( $E_{d2}$ ) или в окружающей среде ( $E_{d3}$ ), которой могут быть Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, AlGa<sub>n</sub> или стекла. Это является причиной потемнения стекол. Ловушечные состояния и потемнения наблюдаются в легированных стеклах при низких температурах. В нелегированных стеклах этот эффект не наблюдается.

Важными факторами сохранения когерентности квантовых состояний в квантовых точках является их структурная идентичность, т.е. их размеры, 3D форма, расстояние между точками и их взаимное расположение, которые должны быть одинаковыми, а кристаллическая структура внутри и на поверхности не содержать дефектов. Энергия размерного квантования (мэВ) должна быть больше 100-150 мэВ и превышать тепловую энергию частиц при комнатной температуре, которая равна ~26 мэВ. В таком соотношении разброс энергий носителей зарядов по сравнению с энергией кТ можно не учитывать. Это обеспечивает длительное сохранение когерентности квантовых состояний при комнатной температуре. Управлять энергетическим спектром квантовых точек можно изменением размеров самих точек, а также их кластеров, что позволяет регулировать области поглощения или излучения ими света [5].

## ТЕХНОЛОГИИ И КВАНТОРАЗМЕРНЫЕ СТРУКТУРЫ

Для получения массивов квантовых точек используются механизмы самосборки атомов, при которых отдельные атомы и молекулы «выстраиваются» в упорядоченные структуры силами механических напряжений между подложкой и растущей фазой или каталитическими химическими процессами при росте. Примером таких реакций являются биологические системы, в которых катализаторы-ферменты собирают аминокислоты и формируют живые ткани.

Для оценки роли механизмов декогерентизации использовались процессы внутреннего усиления тока и света, что позволяет регистрировать слабые сигналы соизмеримые с локальным влиянием колебаний кристаллической решетки, т.е. фононов. Для внутреннего усиления фототока использовалось лавинное усиление фототока и усиление в полевых транзисторах с высокой подвижностью электронов (НЕМТ) в гетероструктурах нитридов галлия, индия и алюминия.

Благодаря возможностям создания больших потенциальных скачков на интерфейсах гетеропереходов AlGa<sub>n</sub>/Ga<sub>n</sub> образуется двумерный электронный газ (ДЭГ) (Рис. 3) с рекордной плотностью до  $2.45 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ . Этому также способствуют сильные поля спонтанной пьезоэлектрической поляризации. Хотя плотность двумерного электронного газа в десять раз выше, чем для других гетероструктур, экспериментальные значения в 2-3 раза меньше из-за ограничений, обусловленных дефектами на интерфейсах.

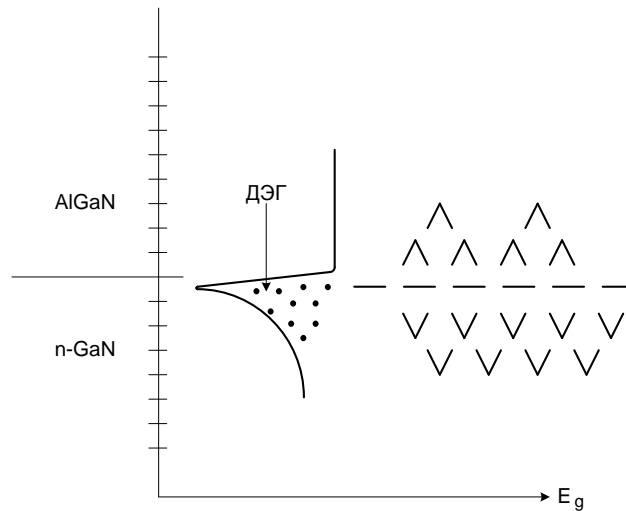


Рис. 3. Образование двумерного электронного газа на гетерогранице AlGaN/GaN и механизм захвата электронов дефектами интерфейса

При больших величинах токов и напряжений в гетеротранзисторах наблюдается так называемый коллапс тока (current collapse). Он состоит в сильном уменьшении тока при напряжении затвора близком к пороговому. Из-за этого эффекта при больших входных сигналах пиковый ток прибора обычно в 3-5 раз меньше ожидаемого из характеристик на постоянном токе. Это является главной проблемой практического применения полевых транзисторов на GaN.

В литературе обсуждаются такие механизмы коллапса тока: захват электронов канала в барьерном или буферном слое, плавающий потенциал подложки, пьезоэлектрические напряжения, индуцируемые внешним потенциалом. В зависимости от механизма коллапса тока для его устранения разрабатывались различные технологии и структуры приборов: улучшалась технология формирования затвора, пассивация поверхности, создание второго квантового барьера для ограничения потока носителей и другие модификации технологии. Однако самым надежным методом устранения коллапса тока в широком диапазоне температур является устранение дефектов на гетерогранице, которые уменьшают концентрацию носителей в двумерном электронном газе (ДЭГ). По аналогии с гетеролазерами для уменьшения и снятия этого фактора создаются двойные гетероструктуры.

По данным фотолюминесцентных измерений концентрация индия в слое InGaN составляла 10% ( $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}$ ). Для этих измерений была выращена многослойная структура GaN/InGaN с многими квантовыми ямами (MQW), которая осаждалась на слой GaN толщиной 0.4 мкм, выращенный на карбиде кремния. Условия роста калибровочной многослойной квантоворазмерной структуры и гетерополевого транзистора поддерживались одинаковыми. Гетероструктуры имели следующие параметры:  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}(250\text{\AA})/\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{N}(50\text{\AA})/\text{GaN}(0,4\text{мкм})/\text{iSiC}$ . Для двойного гетерополевого транзистора (ДГПТ) с длиной затвора 1.5 мкм получен ток насыщения 0.9 А/мм и выходная СВЧ-мощность 6.3 Вт/мм при всего лишь 4 дБ уменьшении усиления при насыщении. В этих транзисторах коллапса тока не наблюдалось. В них исключено образование второго паразитного канала, улучшена морфология поверхности и упрощена процедура эпитаксиального роста. Комбинация слоя с малой  $E_g$  и поляризационными зарядами создает улучшенные условия ограничения двумерного электронного газа. Это расширяет диапазон напряжений затвора, а электроны локализуются внутри квантовой ямы InGaN толщиной 50 Å. В аналогичной одиночной гетероструктуре при больших отрицательных напряжениях в GaN буфере создается хвост концентрации электронов. На рис. 4 приведены автокорреляционные функции исследованных транзисторных гетероструктур для темновых и смешанных (темновых+световых импульсов). Из приведенных кривых АКФ видно, что время жизни на уровнях ловушек уменьшается для более совершенных интерфейсов, каковыми являются структуры с добавлением индия и двойные гетероструктуры. При этом время жизни носителей заряда на уровнях ловушек интерфейса изменялось от  $10^{-10}$  с до  $3 \cdot 10^{-9}$  с.

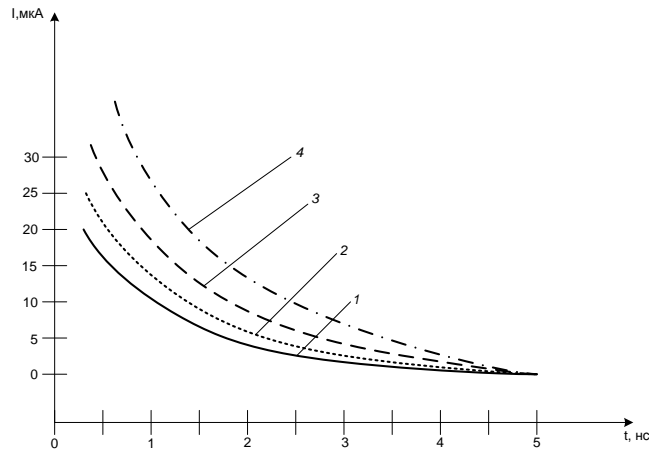


Рис. 4. Автокорреляционные функции для темновых (1) и смешанных (темновых+световых) импульсов для AlGaIn/GaN ГПТ (4), AlGaIn/InGaIn ГПТ (3), AlGaIn/InGaIn/AlGaIn ДГПТ (2).  $\lambda=350$  нм,  $N_T(\sim 6000$  имп/с),  $N_{TC}=15000$  имп/с

В сводной таблице 1 представлены результаты исследования опытных образцов отличающихся составом области канала и слоев гетероструктур.

Таблица 1.

**Параметры поверхностных состояний гетероструктур полевых транзисторов на III-нитридах**

№ п/п	Тип и обозначение гетероструктуры, технология	Концентрация ловушек, $см^{-2}$	Время жизни носителей на глубоких центрах, с.	Плотность электронов в канале, $n \cdot 10^{13} см^{-2}$	Наличие коллапса тока на частоте
1.	AlGaIn/GaN (ГПТ), МОСЭ	$1.2 \cdot 10^{13}$	$10^6$	1.0	Есть, 2 ГГц
2.	SiO <sub>2</sub> /AlGaIn/GaN-(МДП ГПТ), МОСЭ	$9 \cdot 10^{12}$	$10^{-6}$	1.0	Есть, 2 ГГц
3.	AlGaIn/GaN/AlGaIn (ДГПТ), МОСЭ	$4.5 \cdot 10^{12}$	$0.9 \cdot 10^{-6}$	2.0	Нет, 14 ГГц
4.	AlGaIn/InGaIn/ AlInGaIn (In-ДГПТ), МЛЭ	$3 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{-7}$	2.5	Нет, 20 ГГц
5.	Импульсная атомно-слоевая эпитаксия (ИАСЭ) AlGaIn/InGaIn/AlIn GaIn	$< 10^{12}$	$2 \cdot 10^{-7}$	3.1	Нет, 24 ГГц

Как видно из таблицы, наибольшее влияние на параметры оказывает концентрация ловушек и время жизни на них носителей.

Проведенные эксперименты показывают, что с уменьшением концентрации ловушек плотность электронов в канале возрастает. Введение атомов индия в структуру приводит к уменьшению нестабильности процесса лавинного пробоя, уменьшению темновых токов при рабочих напряжениях и увеличению порога чувствительности.

В двойной гетероструктуре левого транзистора пробой у поверхности устраняется. Характеристики приборов указывают на лавинный механизм процесса пробоя. Гетероструктуры характеризуются достаточно высокой пороговой чувствительностью (измеренной на частоте 1 кГц -  $5 \cdot 10^{14}$  Дж и коэффициентом умножения 25-30 при минимальном шуме).

Реализация высокой квантовой чувствительности гетерополевых транзисторов облегчает определение энергий ширины запрещенной зоны в области канала и уровня глубоких центров.

Исследование спектральной чувствительности в зависимости от длины волны дает характерный максимум в диапазоне длин волн 340-360 нм, а чувствительность, измеренная на длине волны 350 нм – составляет 20-30 А/Вт (Рис. 5).

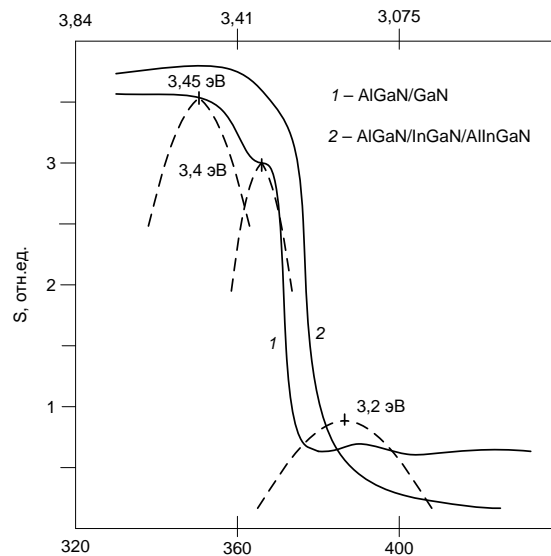


Рис. 5. Спектры фоточувствительности НЕМТ-структур AlGaIn/GaN (кривая 1) и AlGaIn/AlInGaIn (кривая 2)

В итоге разработанная методика позволяет определять следующие параметры поверхностных состояний гетероструктур III-нитридов:

- поверхностная концентрация глубоких центров захвата носителей тока;
- время жизни носителей заряда на уровнях ловушек;
- скорость поверхностной рекомбинации;
- время захвата носителей тока;
- время релаксации носителей тока;
- энергия уровня глубоких центров.

Наиболее высокое качество гетерослоев и интерфейсов обеспечивается при импульсной атомно-слоевой эпитаксии (ИАСЭ) многокомпонентных твердых растворов.

В спектре НЕМТ-структуры №1 с коллапсом тока имеются 3 полосы, тогда как спектр структуры №2 без коллапса тока полос не содержит. Разложение спектра №1 в ряд по дифференциальным моментам дает четкие линии с энергиями максимумов 3.45, 3.4, 3.2 эВ.

Импульсное возбуждение фототока позволило определить времена релаксации фотоносителей, которые для соответствующих линий равны 50 нс, 120 нс, 10 мс. Медленное затухание фототока в линии 3.2 эВ может быть связано с захватом электронов и медленным освобождением из ловушек-интерфейса. Об этом также свидетельствует тот факт, что в спектре фоточувствительности НЕМТ-структуры с низкой концентрацией ловушек в ДППТ (№ 4 таблицы 1) эта линия очень мала (Рис. 5).

Усиление света в гетеролазерах также весьма чувствительно к рассеянию носителей тока в гетероструктурах. Высокоэффективные лазерные и светодиодные источники света реализуются на прямозонных полупроводниках, в которых межзонные энергетические переходы происходят без участия фононов, т.е. электроны и дырки не взаимодействуют с тепловыми колебаниями решетки. Однако дефекты имеют значительно большие среднеквадратичные динамические смещения атомов решетки, которые взаимодействуют с носителями тока, захватывая их, что уменьшает квантовый выход излучения и способствует разрушению когерентности. Поэтому светодиоды и лазеры с квантовыми точками являются эффективными объектами исследования декогерентизации, особенно гетеролазеры.

Для получения больших энергий размерного квантования, существенно превышающих энергии колебаний атомов решетки при комнатных температурах (25 мэВ) большой интерес представляют широкозонные нитриды галлия-алюминия и индия, которые являются прямозонными, что обуславливает энергетические переходы без участия фононов. Лазерные структуры на основе нитридов галлия, индия и алюминия могут содержать активный слой с квантовыми точками  $\text{In}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}$ , плотностью  $10^{10} \text{ см}^{-2}$ , энергетический зазор которых с окружающей матрицей AlGaIn составляет 2,6 эВ, что обеспечивает энергетическую изоляцию квантовых точек (Рис. 6) и независимость параметров лазерного излучения от температуры (Рис. 7, линия 3).

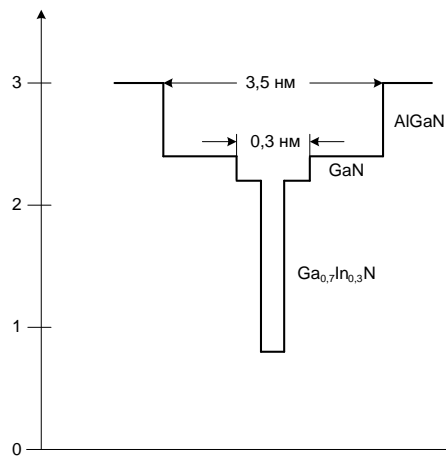


Рис. 6. Энергии и атомные составы когерентной квантовой точки активного слоя гетеролазера на основе твердых растворов AlGaInN, работающих при комнатной температуре

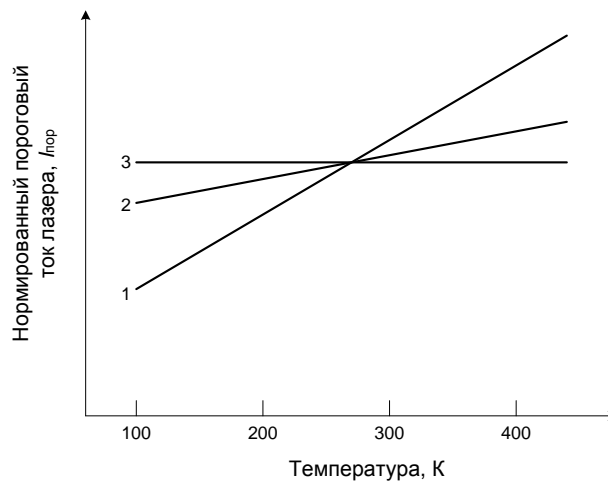


Рис. 7. Температурные зависимости порогового тока гетеролазеров AlGaAs/GaAs (1); InGaAsP/InGaAs (2) и AlGaInN/InGaN (3)

Методом газофазной эпитаксии в нанореакторах оксида алюминия выращены стержни нитрида галлия и кванторазмерные структуры нитрида галлия индия с низкой плотностью дефектов, что позволяет создавать бездефектные квантовые точки в широкозонной матрице (Рис. 8, а). Фотолуминесценция таких квантовых точек методом сканирующей микроскопии ближнего поля с заточенным оптоволоконном диаметром 0.25 мкм [6] дает пространственное изменение степени когерентизации, которая резко уменьшается на расстоянии 40-60 нм от квантовой точки (Рис. 8, б). Это позволяет проектировать и создавать топологические решения расположения квантовых точек в квантовых процессорах [1, 2].



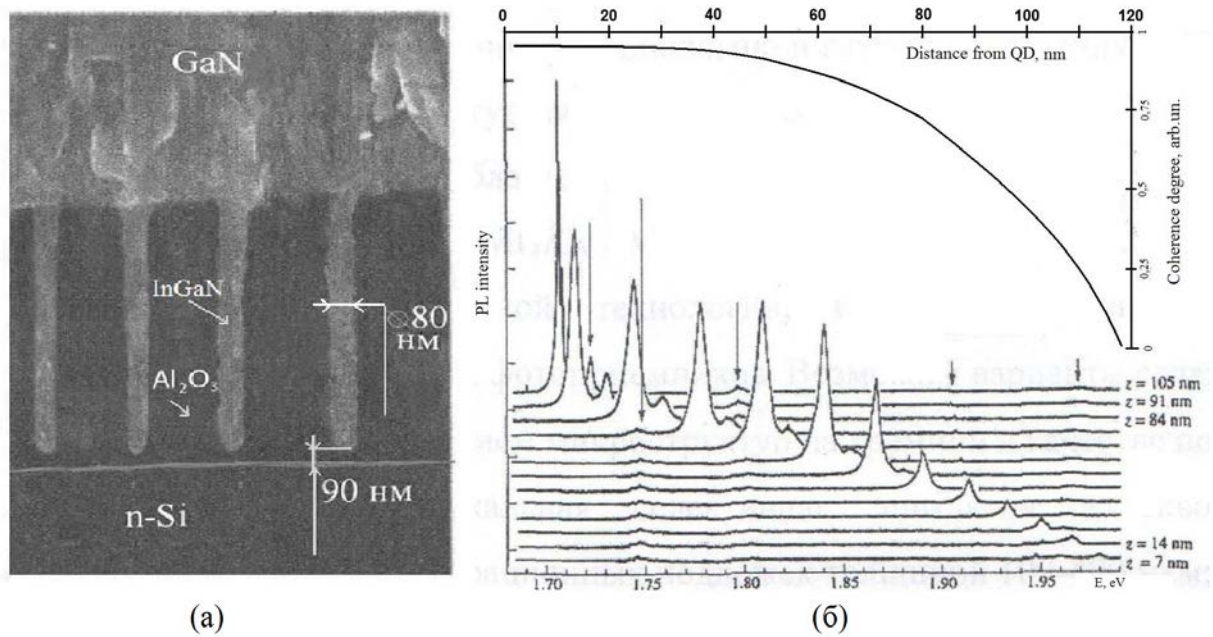


Рис. 8. Растровая электронная микроскопия наностержней GaN с квантовыми точками InGaN в порах оксида алюминия на подложках кремния (а); Зависимость спектров фотолуминесценции (внизу) и соответствующей степени когерентности (вверху) от расстояния до квантовой точки (б)

### ВЫВОДЫ

Сравнение параметров и характеристик элементов квантовых вычислений основанных на различных физических принципах (Таблица 2) показывает, что наиболее реальными для применения в квантовых компьютерах, работающих при комнатных температурах являются квантовые точки в прямозонных материалах  $A_3B_5$ , в которых реализованы практически бездефектные наноструктуры на подложках кремния с транзисторными интегральными схемами.

Таблица 2.

## Сравнение параметров и характеристик квантовых вычислений на различных физических принципах

№ п/п	Физический принцип	Кол-во реализованных кубитов	Время/макс. степень когерентности	Компания или группа	Роль кубита играет	Управление	Температура	Преимущества
1.	Ядерные спины	5-7	10-100 нс/0.25	IBM	Ядерные спины в жидкости	Электромагнитные импульсы, ЯМР-сканер	Крио-температуры	ЯМР-сканеры
2.	Джозефсоновские переходы	2 (>10)	100 мкс/0.3	NEC, Япония D-Wave	Присутствие/отсутствие – куперовские пары в пространстве	Внешний потенциал / магнитный поток	Крио-температуры	Этот тип КЯ уже активно используется
3.	Ионные ловушки	10	50 нс/0.2	Д.Винланд, П.Золлер, Р.Блатт	Основное / возбужденное состояния внешнего электрона в ионе	Лазерные импульсы	~77 К	Комнатные температуры
4.	Фотосинтез в растениях	>10 <sup>2</sup>	часы/0.4	Лоуренсовская лаб. + Калифорнийский унив. в Беркли	Бактериохлорофил	Свет	77 К регистрация Т-комн.-функционирование	Большое время когерентности
5.	Водоросли Chroocoonas CEMP 270	>10 <sup>2</sup>	месяцы/0.35	Канада, Торонто	Хлорофил, родопсин, пигменты	Свет различных длин волн	Т-комнатная	Большое время когерентности при Т-комн., генная инженерия, выработка кислорода, малое энергопотребление, дешевое производство
6.	Вакансии в Изотопе C <sup>13</sup>	5-10	2 с/0.2	Гарвардский университет, проф. М.Лукин		Лазерный луч	Т-комнатная	Комнатные Т
7.	Квантовые точки A <sup>3</sup> B <sup>5</sup> (AlGaInN)	>4	30 мкс – 10 с/0.4	Центр оптоэлектронных технологий, г.Киев, проф. В.Осинский	Нахождение или отсутствие электрона или направление электронного и/или ядерного спина	Внешний потенциал или лазерный суперлюминесцентный луч	Т-комнатные	Комнатные температуры, технологическая совместимость с Si-ИС

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Осинский В.И. Информационные нанотехнологии / И.В. Масол, В.И. Осинский, О.Т. Сергеев. – К.: Макрос, 2011. – 560 с.
2. От гетеролазера до квантового компьютера / А.В. Палагин, В.И. Осинский, А.А. Мержвинский, А.В. Осинский, А.И. Золотопуп, Н.И. Ходаковский // Computers in Europe. Past, Present and Future: Proceeding II International Symposium. – October 1998. – Kiev. – P.437-451.
3. Banyai L, Koch S.W. Semiconductor Quantum Dots.-World Scientific.-1993.
4. Bryant G.W. Physica B, (March 1993) Submitted to Phys. Rev. 1993.
5. Патент Украины № 33246 Квантовый процессор. Палагин А.В., Осинский В.И., Мержвинский А.А., Осинский А.В., Золотопуп А.И., Ходаковский Н.И., Яворский И.А.. – 2001 г.
6. Видимый эффект микрорезонатора в ближнем поле фотолюминесценции одной квантовой точки / А.М. Минтаиров, С.В. Осинский, О.В. Коваленков и др. // Физика и технологии. – 2000. – Санкт-Петербург. – ст. 232-235.

Надійшла до редакції 14.05.2014р.

**ОСИНСКИЙ В.И.** – д.т.н., проф., директор Центра оптоэлектронных технологий НИИ «Микроприборы» НАНУ, г.Киев, Украина, тел. (044) 434-76-55, E-mail: osinsky@imd.org.ua.

**МАСОЛ И.В.** – к.т.н., президент компании «Росток», г. Киев, Украина.

**ОНАЧЕНКО М.С.** – аспирант, инженер Центра оптоэлектронных технологий НИИ «Микроприборы» НАНУ, г. Киев, Украина.

**СУШИЙ А.В.** – аспирант, инженер Центра оптоэлектронных технологий НИИ «Микроприборы» НАНУ, г. Киев, Украина.