

2. Kolos, V.V. Effect of pulse photon processing on structure and electrophysical properties of TiN/Ti/Si system /Markevich, M.I., Stelmakh, V.F., Chaplanov, A.M. // VII-th conference Ion Implantation and Other Applications of Ions and Electrons // Kazimiers Dolny. Poland. 2008.– P. 128.
3. Чапланов, А. М., Адашкевич, С. В., Турцевич, А. С., Маркевич, М. И., Стельмах, В. Ф., Колос, В. В. Способ формирования пленки дисилицида титана на кремниевой подложке. Заявитель: филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «Интеграл». - №U 20110787; заявл. 04.08.11; опубл. // Афіцыйны бюл. / Нац. Центр уласнасці. -2013. ВУ(11) 16070 (13).
4. Иевлев, В. М. Получение TiSi<sub>2</sub> при импульсной фотонной обработке гетероструктуры TiN/Ti/Si / С. В. Канькин, В. В. Колос, С. Б. Кушев, М. И. Маркевич, А. М. Чапланов, В. Ф. Стельмах // Неорганические материалы. - 2009. Т.45. №7. С.835-838.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ СТРУКТУРЕ ИЗ GaN

**В. Н. Мищенко**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
mishchenko@bsuir.by*

Исследование электронного транспорта в полупроводниковых структурах из нитрида галлия (GaN) вызывает интерес, связанный с разработкой лазеров, светоизлучающих диодов, транзисторов диапазонов СВЧ и КВЧ, в которых используются гетероструктуры вида InGaN/GaN и AlGaN/GaN. Материал GaN относится к группе широкозонных полупроводниковых материалов с шириной запрещенной зоны равной 3,5 эВ. В этом материале сочетаются такие положительные свойства как высокая тепловая проводимость и большая величина напряжения пробоя. Отмеченные свойства материала GaN делают его весьма привлекательными для разработки высокоскоростных и мощных полупроводниковых приборов и вызывают интерес к исследованию его характеристик [1, 2]. Известно, что на границе раздела материалов отмеченных выше гетероструктур возникает двухмерный газ, в котором формируется канал переноса электронов с высокой подвижностью, что приводит к улучшению выходных характеристик приборов [3]. Исследование свойств такого канала вызывает необходимость изучения, в первую очередь, процессов переноса носителей заряда в материале GaN, который является основной частью приборов. Было выполнено ряд исследований, направленных на изучение свойств и характеристик полупроводниковой структуры с использованием материала GaN [4, 5]. Однако ряд моментов, связанных с особенностями электронного транспорта в реальных субмикронных трехмерных (3D) приборных структурах из GaN, продолжает оставаться не изученным и вызывает научный интерес.

В разработанной программе, использующей метод Монте-Карло для трехмерной приборной структуры из GaN, рассматривались следующие основные механизмы рассеивания электронов: на оптических фононах, на акустических фононах, на ионизированной примеси (подход Брукса-Черринга), пьезоакустическое рассеивание, при ударной ионизации, междолинное и внутримолинное рассеивания [4, 6]. Были исследованы процессы переноса электронов в 3D приборной структуре из GaN с концентрацией электронов  $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и при температуре  $T$  в диапазоне от 50 до 500 К.

Известно, что результаты моделирования с использованием метода Монте-Карло зависят от значений основных электрофизических параметров материала и парамет-

ров модели зоны проводимости. В настоящее время для материала GaN с вариантом кристаллической структуры – вюрцит (wurtzite) общепризнанной является трехдолинная модель, в которой одной нижней долине  $\Gamma_1$  сопутствуют верхние долины  $L-M$  (общее количество – 6 долин) и  $\Gamma_2$  (общее количество – 1 долина) [4, 6]. При моделировании были использованы параметры для материала GaN, данные о которых приведены в табл. 1–2 [4, 5, 7]. Значения параметров (констант) междолинной связи выбиралось одинаковым для всех переходов и равным  $1 \cdot 10^9$  эВ/см [4]. Энергии междолинных и внутриволинных фононов принимались равными 0,092 эВ [5].

Таблица 1

**Значения основных электрофизических параметров материала GaN**

| Параметр, размерность                           | Значение параметра |
|---|--------------------|
| Плотность, гр/см <sup>3</sup>                   | 6,1                |
| Продольная скорость звука, 10 <sup>3</sup> м/с  | 6,6                |
| Статическая диэлектрическая проницаемость       | 8,9                |
| Высокочастотная диэлектрическая проницаемость   | 5,35               |
| Энергия оптического фонона, эВ                  | 0,092              |
| Пьезоэлектрическая постоянная, С/м <sup>2</sup> | 0,375              |

Таблица 2

**Значения параметров моделирования для материала GaN**

| Параметр  | Долина (зазор между долинами) | Значение параметра |
|---|-------------------------------|--------------------|
| Акустический деформационный потенциал, эВ         | $\Gamma_1$                    | 8,3                |
|   | $L-M$                         | 8,3                |
|   | $\Gamma_2$                    | 8,3                |
| Относительная эффективная масса электрона         | $\Gamma_1$                    | 0,2                |
|   | $L-M$                         | 0,4                |
|   | $\Gamma_2$                    | 0,6                |
| Коэффициент непараболичности, (эВ <sup>-1</sup> ) | $\Gamma_1$                    | 0,183              |
|   | $L-M$                         | 0,065              |
|   | $\Gamma_2$                    | 0,029              |
| Величина междолинного зазора, эВ                  | $\Gamma_1-L-M$                | 2,0                |
|   | $\Gamma_1-\Gamma_2$           | 2,1                |

Полученные зависимости средней дрейфовой скорости электронов  $V$  (кривая 1) и средней энергии электронов  $E$  (кривая 2) от напряженности электрического поля представлены на рисунке. Анализ рисунка показывает, что максимальное значение средней дрейфовой скорости электронов составляет приблизительно  $3,1 \cdot 10^7$  см/с при величине напряженности электрического поля равном приблизительно 200 кВ/см. В дальнейшем при увеличении напряженности электрического поля наблюдаются процессы перехода электронов в верхние боковые долины  $L-M$  и  $\Gamma_2$  и средняя дрейфовая скорость электронов монотонно уменьшается. Величина средней энергии электронов монотонно увеличивается с ростом напряженности электрического поля и только при значениях напряженности выше 450 кВ/см превышает величину энергии равную 1 эВ.

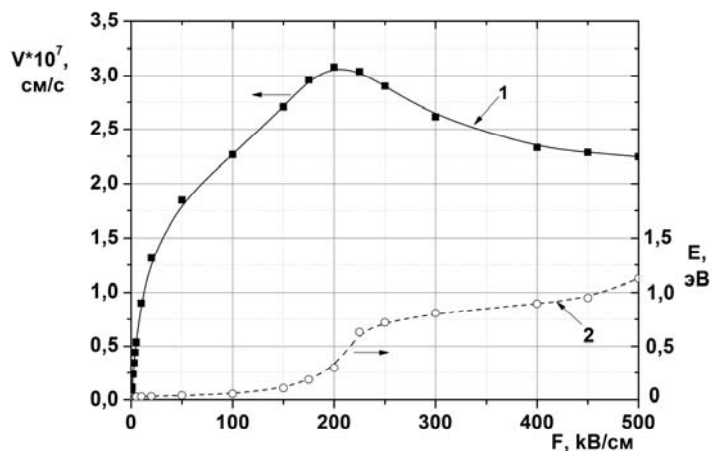


Рисунок – Зависимость средней дрейфовой скорости и средней энергии электронов от напряженности электрического поля

При моделировании описанной выше полупроводниковой структуры получены зависимости подвижности электронов, коэффициента диффузии от напряженности электрического поля, температурная зависимость подвижности электронов. В процессе моделирования при температуре равной 300 К было получено значение электронной подвижности электронов равное  $1080 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ . Это весьма близко к экспериментально измеренному значению холловской подвижности равной приблизительно  $1000 \text{ см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$  [7–9].

Разработанная программа моделирования процессов переноса электронов позволила оценить их основные характеристики - среднюю дрейфовую скорость и энергию, подвижность и коэффициент диффузии от напряженности электрического поля и температуры в трехмерной приборной структуре из материала GaN. Это дает возможность исследовать основные выходные параметры транзисторов и других приборных структур, в которых используется материал GaN, а также рассмотреть направления оптимизации такого рода структур в диапазонах СВЧ и КВЧ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. AlGaIn/GaN-СВЧ НЕМТ-транзисторы с пробивным напряжением выше 100 В и с предельной частотой усиления по мощности  $f_{\text{max}}$  до 100 ГГц / В. Г. Мокеров [и др.] // Физика и техника полупроводников, т. 48, в. 4, 2009, с. 561–567.
2. Nakamura S. The Blue Laser Diode – GaN based Light Emitters and Lasers / S. Nakamura, G. Fasol. - SpringerVerlag, Heidelberg, 1997.
3. Shur M. High Electron Mobility in Two-Dimensional Electrons Gas in AlGaIn/GaN Heterostructures and in Bulk GaN / M. S. Shur, B. Gelmont, and M. Asif Khan // J. Electronic Materials, v. 25, n. 5, 1996, p. 777–785.
4. Bhapkar U. V. Monte Carlo calculation of velocity-field characteristics of wurtzite GaN / U. V. Bhapkar, M. Shur // J. Appl. Phys., v. 82(4), 1997, p. 1649–1655.
5. Kolnik J. Electronic transport studies of bulk zinkblende and wurtzite phases of GaN based on an ensemble Monte Carlo calculation including a full zone band structure / J. Kolnik [и др.] // J. Appl. Phys., v. 78(2), 1995, p. 1033–1038.

6. Шур М. Современные приборы на основе арсенида галлия: пер. с англ. / М. Шур. – М.: Мир, 1991. 632 с.
7. Chin V. W. L. Electron mobilities in gallium, indium, and aluminium nitrides / V. W. L. Chin, T. L. Tansley, and T. Osotchan // J. Appl. Phys., v. 75(11), 1994, p. 7365–7372.
8. Nakamura S. In situ monitoring and Hall measurement of GaN grown with GaN buffer layers / S. Nakamura, T. Mukai, and M. Senoh. // J. Appl. Phys., v. 71(11), 1992, p. 5543–5549.
9. Plegems M. Electron properties of n-type vapor-grown gallium nitrides / M. Plegems, H. C. Montgomery // J. Phys. Chem. Solids, v. 34, 1973, p. 885–895.

## ОПТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ ТОНКИХ ПЛЕНОК $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

**А. В. Мудрый, О. М. Бородавченко, В. Д. Живулько**

*ГНПО «НПЦ по материаловедению НАН Беларуси», mudryi@physics.by*

В последние годы четырёхкомпонентное полупроводниковое соединение  $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$  (CZTSe) со структурой кестерита начинает занимать лидирующие позиции в качестве перспективного материала для тонкоплёночных солнечных элементов [1–3]. Коэффициент полезного действия (к.п.д.) солнечных элементов на основе CZTSe достиг значения  $\sim 11,6\%$  [4], а в случае добавления атомов серы и образования твёрдых растворов CZT(Se,S) к.п.д. составляет  $\sim 12,6\%$  [5]. Дальнейший прогресс в повышении к.п.д. солнечных элементов на основе тонких плёнок CZTSe связан с более детальным изучением их физических свойств и расширением знаний об энергетической зонной структуре этого материала. В настоящей работе изложены новые данные по использованию фотолюминесценции (ФЛ) и спектров возбуждения люминесценции (СВЛ) для определения ширины запрещённой зоны  $E_g$  и механизмов излучательной рекомбинации в широком диапазоне интенсивностей лазерного излучения в соединении CZTSe.

Исследования проводились на плёнках CZTSe, сформированных на слое молибдена ( $\sim 300$  нм), предварительно осаждённом на стеклянной подложке с толщиной  $\sim 1$  мм. Тонкие плёнки CZTSe были синтезированы селенизацией металлических слоёв Cu, Zn и Sn (прекурсоров), осаждённых на слой Mo методом магнетронного распыления соответствующих чистых металлических источников [6, 7]. Толщина плёнок CZTSe, сформированных при  $T \sim 550^\circ\text{C}$ , составляла  $\sim 1,6$  мкм по данным измерения поперечных сколов с использованием сканирующей электронной микроскопии. Элементный состав плёнок определялся методом рентгеноспектрального локального микроанализа с волновой дисперсией (WDA). Измеренный в десяти точках поверхности плёнок усреднённый элементный состав составил: Cu  $\sim 22,7$  ат.%, Zn  $\sim 14,8$  ат.%, Sn  $\sim 12,7$  ат.% и Se  $\sim 49,8$  ат.%. Дефицит меди к суммарному содержанию Zn и Sn составил  $\text{Cu}/(\text{Zn}+\text{Sn}) \sim 0,82$ . Избыток Zn по отношению к олову составил  $\text{Zn}/\text{Sn} \sim 1,17$ , а соотношение Se к содержанию металлов оказалось близким к стехиометрии  $\text{Se}/(\text{Cu}+\text{Zn}+\text{Sn}) \sim 0,99$ . Спектры ФЛ и СВЛ регистрировались по методике, описанной в [6, 7].

На рисунке 1 приведены спектры ФЛ тонких плёнок CZTSe, снятые при 4,2 К в зависимости от мощности лазерного излучения в диапазоне  $0,007 - 1,000$  Вт/см<sup>2</sup>. При возбуждении непрерывным излучением твердотельного лазера с диодной накачкой на длине волны 532 нм спектры ФЛ характеризуются одиночной асимметричной по-