

РАДИАЦИОННЫЕ ДЕФЕКТЫ В InN, ОБЛУЧЕННОМ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ

В.Д. Живулько¹⁾, А.В. Мудрый¹⁾, М.В. Якушев²⁾, Р. Мартин²⁾, В. Шафф³⁾, Х. Лу³⁾, А.Л. Гурский⁴⁾

¹⁾ Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, ул. П. Бровки, 19, 220072 Минск, Беларусь, тел. 284-12-29, mudryi@iftt.bas-net.by

²⁾ Факультет физики, Страдклайдский университет, ул. Роттенроу, 107, G40NG Глазго, Великобритания, тел. 44(141)5483374, michael.yakushev@strath.ac.uk

³⁾ Факультет электрической и компьютерной инженерии, Корнельский университет, Итака, Нью-Йорк 14853, США, тел. 607-255-3974, wjs2@cornell.edu

⁴⁾ Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, 6, 220013 Минск, Беларусь, тел. 293-23-08, gurskii@bsuir.by

Исследовано влияние электронного облучения (6 МэВ, доза 10^{15} - 10^{18} см⁻²) на смещение края фундаментального поглощения и люминесцентные свойства пленок InN, выращенных на сапфировых подложках с использованием метода молекулярно-лучевой эпитаксии. Установлено, что облучение приводит к увеличению концентрации электронов и ширины запрещенной зоны InN за счет образования собственных дефектов структуры донорного типа и проявления эффекта Бурштейна-Мосса.

Введение

Установление нового значения ширины запрещенной зоны $E_g \sim 0.7$ эВ [1] для прямозонного полупроводникового соединения InN вместо использованного в течении 30 лет значения ~ 2.0 эВ [2] открыло новые возможности для оптоэлектроники всех нитридных соединений AlN, GaN, InN и твердых растворов на их основе AlGaIn и InGaIn [3,4]. В частности, выращивание твердых растворов AlGaIn и InGaIn на основе прямозонных полупроводниковых соединений AlN с $E_g \sim 6.2$ эВ или GaN с $E_g \sim 3.4$ эВ и InN с $E_g \sim 0.7$ эВ позволяет полностью перекрыть ультрафиолетовый, видимый и ближний инфракрасный диапазон от 0.2 до 1.8 мкм и приступить к созданию высокоэффективных светодиодов и лазерных структур для этой спектральной области [3, 4]. В связи с появлением после 2002 года нового типа полупроводниковых структур и приборов на основе InN, InGaIn и AlGaIn возникла необходимость дальнейшего более углубленного изучения физических свойств InN в том числе и после радиационных воздействий [5,6]. Существующие на сегодняшний день экспериментальные данные о влиянии облучения (электроны, протоны, альфа-частицы и др.) на физические свойства InN и структур на его основе ограничены и поэтому требуется проведение дальнейших исследований в этом направлении. В настоящей работе приведены новые данные по влиянию электронного облучения на оптические свойства высококачественных пленок InN.

Методика эксперимента

Исследовались эпитаксиальные пленки InN с толщиной ~ 12 мкм выращенные в Корнельском университете (США) методом молекулярно-лучевой эпитаксии на сапфировых подложках с буферным слоем GaN [7,8]. Пленки InN обладали n-типом проводимости, концентрацией электронов $n_e \sim 3.6 \cdot 10^{17}$ см⁻³ и подвижностью $\mu \sim 2000$ см²/В·с. Образцы облучались электронами с энергией ~ 6 МэВ в интервале доз

$10^{15} - 10^{18}$ см⁻² при комнатной температуре. Спектры оптического пропускания регистрировались в спектральном диапазоне 200 – 3000 нм с использованием двулучевого спектрофотометра Cary 500 UV-Vis-NIR или монохроматора МДР-23У с фокусным расстоянием зеркального объектива $f \sim 60$ см и дифракционной решеткой 300 штр./мм. Измерение фотолюминесценции (ФЛ) проводилось с использованием аргонового лазера на $\lambda \sim 488$ нм мощностью до 200 мВт или твердотельного лазера с диодной накачкой на $\lambda \sim 532$ нм мощностью до 500 мВт. Другие особенности методики оптических измерений изложены в работе [9].

Экспериментальные результаты и их обсуждение

В качестве примера на рис. 1 приведены спектры оптического пропускания необлученной и облученной электронами пленок InN, снятые при комнатной температуре. Как видно, пленки обладают пропусканием на уровне 15 – 20 % и характеризуется наличием интерференционной структуры за относительно резким краем фундаментального поглощения, соответствующим ближней инфракрасной области спектра. При этом, облучение приводит к значительному ~ 90 мэВ смещению края собственного пропускания в область высоких энергий. На рис. 2. представлена зависимость параметра $(\alpha h\nu)^2$ от энергии фотонов $h\nu$, где α - коэффициент поглощения, для пленок InN. Расчет проводился на основании известной зависимости коэффициента поглощения от величины пропускания и коэффициента отражения, а также с учетом существования интерференции на границе раздела пленки InN и сапфира [10]. Значение коэффициента отражения принималось равным $R \sim 0.14$. Поскольку InN относится к полупроводникам, имеющим прямозонную энергетическую структуру, то для него справедливо следующее соотношение $\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{1/2}$, где A – постоянная величина,

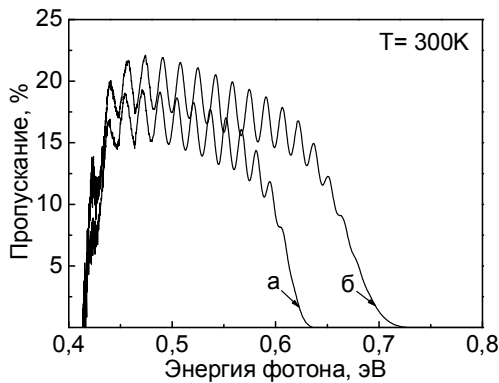


Рис. 1. Спектры пропускания необлученной (а) и облученной электронами дозой 10^{18} см^{-2} (б) пленок InN, снятые при 300 К

E_g – ширина запрещенной зоны [10]. Численные значения E_g соединения InN были получены путем экстраполяции прямолинейных участков в спектральной зависимости параметра $(\alpha h\nu)^2 \sim f(h\nu)$ к оси энергии фотонов, рис. 2.

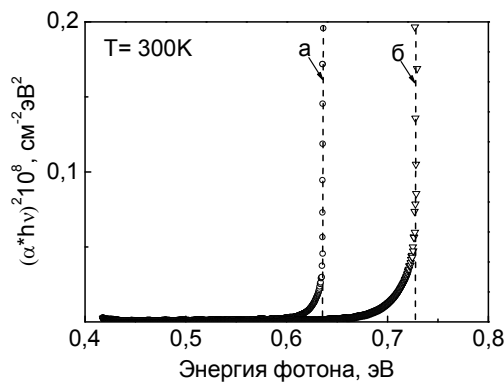


Рис. 2. Спектральная зависимость параметра $(\alpha h\nu)^2$ от энергии фотонов $h\nu$ для необлученной (а) и облученной (б) пленки InN

Эти значения E_g составили 0.638 эВ и 0.729 эВ для необлученной и облученной дозой $\sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$ пленок InN, соответственно. Основываясь на этом можно утверждать, что облучение соединения InN высокоэнергетическими электронами приводит к образованию радиационных дефектов донорного типа обеспечивающих более высокий уровень легирования. Эксперименты показали, что увеличение дозы облучения в диапазоне от 10^{15} см^{-2} до 10^{18} см^{-2} приводит к последовательному смещению края фундаментального поглощения в область высоких энергий. В дополнение к оптическим данным электрические измерения на пленках InN с использованием эффекта Холла показали увеличение концентрации электронов и снижение их подвижности с увеличением дозы облучения. Поэтому высокоэнергетическое смещение края фундаментального поглощения можно связать с

проявлением эффекта Бурштейна-Мосса. На рис. 3. и рис. 4. приведены спектры ФЛ необлученной и облученной электронами дозой $\sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$ пленок InN снятые при комнатной и гелиевой температурах, соответственно. Как видно из рис. 3 спектры ФЛ необлученной пленки InN снятые при 300 К содержат широкую полосу ($\sim 100 \text{ мэВ}$) с максимумом $\sim 0.638 \text{ эВ}$ соответствующим по энергии ширине запрещенной зоны $E_g \sim 0.638 \text{ эВ}$, рис. 2. Это означает, что процесс излучательной рекомбинации при 300 К происходит по механизму зона проводимости–валентная зона, т.е. реализуются оптические переходы зона–зона с участием свободных вырожденных электронов и дырок. Эксперименты показали, что увеличение дозы облучения до $1 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ приводит к увеличению интенсивности близкраевой люминесценции, а выше этих доз происходит падение ее интенсивности и значительное увеличение полуширины до 160 мэВ при дозе $\sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$, рис. 2. При этом максимум полосы 0.715 эВ смещен относительно края фундаментального поглощения $E_g \sim 0.729 \text{ эВ}$.

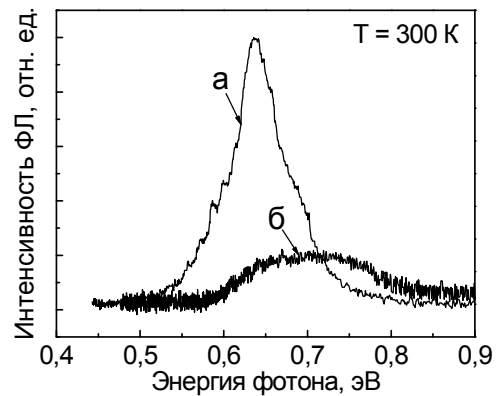


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции необлученной (а) и облученной (б) пленок InN, снятые при 300 К.

Можно утверждать, что в облученных пленках доминирует механизм рекомбинации вырожденных электронов из зоны проводимости в хвосты акцепторных состояний вблизи потолка валентной зоны. Смещение полосы близкраевой люминесценции было отчетливо зарегистрировано в спектрах ФЛ при 4.2 К, рис. 4. Спектры ФЛ необлученных пленок InN содержат несколько полос 0.612 эВ и 0.664 эВ. Эксперименты по зависимости спектров от мощности возбуждения и температуры в интервале 4.2 – 300 К указывают на то, что значительная доля дырок перед рекомбинацией захватывается на мелкие и глубокие акцепторные состояния. В этом случае полоса 0.612 эВ обусловлена рекомбинацией вырожденных электронов с дырками на глубоких уровнях акцепторов. Близкраевая полоса ФЛ $\sim 0.664 \text{ эВ}$ обусловлена излучательной рекомбинацией электронов при оптических переходах на мелкие акцепторные состояния и переходами зона–зона.

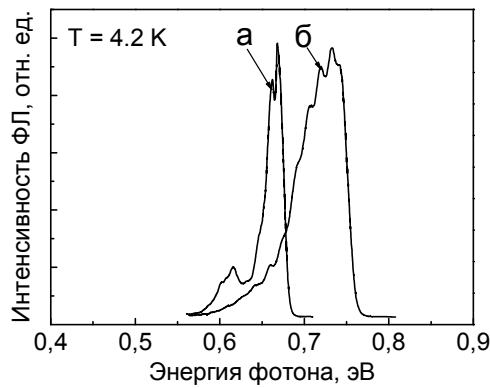


Рис. 4. Спектры фотолюминесценции необлученной (а) и облученной (б) пленок InN, снятые при 4.2 К

Облучение электронами приводит к уширению ближней люминесценции и ее смещению с 0.664 эВ до 0.729 эВ, рис. 4. Сопоставление полученных нами экспериментальных данных по люминесценции и оптическому пропусканию с известными данными по зависимости E_g пленок InN от концентрации электронов n_e [3, 4] позволяет считать, что n_e после облучения пленок InN возрастает до значения $n_e \sim 7 \cdot 10^{18} - 1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ за счет образования собственных радиационных дефектов с донорными уровнями, предположительно вакансий азота V_N [5, 11, 12].

Закключение

Высокоэнергетическое ($\sim 6 \text{ МэВ}$) электронное облучение пленок InN с достигнутым на сегодняшний день минимальным значением концентрации свободных электронов $n_e \sim 3.6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и $E_g \sim 0.638 \text{ эВ}$ при 300 К смещает край фундаментального поглощения до 0.729 эВ при дозе $\sim 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Одновременно с

этим происходит смещение полосы ближней люминесценции и изменение механизма излучательной рекомбинации неравновесных носителей заряда.

Работа выполнена по заданию 4.5.01 ГПНИ «Материалы в технике».

Список литературы

1. Davydov V.Yu., Klochikhin A.A., Seisyan R.P., Emtsev V.V., Ivanov S.V., Bechstedt F., Furthmüller J., Harima H., Mudryi A.V., Aderhold J., Semchinova O., Graul J. // Phys. Status Solid. (b). – 2002. – Vol. 229. – P. R1.
2. Osamura K., Nakajima K., Murakami Y., Shingu P.H., Ohtsuki A. // Solid State Communication. – 1972. – Vol. 11. – P. 617.
3. Wu J. // J. Appl. Phys. – 2009. – Vol. 106. – P. 011101.
4. Bhaigan A.G., Hashimoto A., Yamamoto A. // J. Appl. Phys. – 2003. – Vol. 94. – P. 2779.
5. Tuomisto F., Pelli A., Yu K.M., Walukiewicz W., Schaff W.J. // Phys. Rev. B. – 2007. – Vol. 75. – P. 193R01.
6. Li S.X., Yu K.M., Wu J., Jones R.E., Walukiewicz W., Ager III J.W., Shan W., Haller E.E., Lu H., Schaff W.J. // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol. 71. – P. 161201 (R).
7. Lu H., Schaff W.J., Hwang J., Wu H., Koley G., Eastman L.E. // Appl. Phys. Lett. – 2001. – Vol. 79. – P. 1489.
8. Lu H., Schaff W.J., Hwang J., Wu H., Yeo W., Pharkya A., Eastman L.F. // Appl. Phys. Lett. – 2000. – Vol. 77. – P. 2548.
9. Мудрый А.В., Гременок В.Ф., Иванюкович А.В., Якушев М.В., Феофанов Я.В. // Журнал прикладной спектроскопии. – 2005. – Т. 22. – С. 805.
10. Уханов Ю.И. // Оптические свойства полупроводников. – М.: Наука, 1977. – 366 с.
11. Jones R. E., Li S. X., Hsu L., Yu K. M., Walukiewicz W., Liliental-Weber Z., Ager III J.W., Haller E.E., Lu H., Schaff W.J. // Physica B. – 2006. – Vol. 376 – 377. – P. 436.
12. Rauch C., Tuomisto F., King P. D. C., Veal T. D., Lu H., Schaff W. J. // Appl. Phys. Lett. – 2012. – Vol. 101 – P. 011903.

RADIATION DEFECTS IN InN IRRADIATED WITH HIGH-ENERGY ELECTRONS

V.D. Zhyvulka¹), A.V. Mudryi¹), M.V. Yakushev²), R.W. Martin²), Schaff W.J.³), Lu H.³), Gurskii A.L.⁴)

¹Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Sciences of Belarus, 19 P. Brovka st., 220072 Minsk, Belarus, tel. 284-12-29, mudryi@ifftp.bas-net.by

²Department of Physics, Strathclyde University, 107 Rottenrow, G40NG Glasgow, United Kingdom, tel. 44(141)5483374, Michael.yakushev@strath.ac.uk

³Department of Electrical and Computer Engineering, Cornell University, Ithaca, New York 14853, USA men.607-255-3974, wjs2@cornell.edu

⁴Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 6 P. Brovka st., 220013 Minsk, Belarus, tel.293-23-08, gurskii@bsuir.by

The influence of high energy (6 MeV, fluencies $10^{15} - 10^{18} \text{ cm}^{-2}$) electron irradiation on the fundamental absorption and luminescence properties of InN thin films which were grown on sapphire substrates by molecular beam epitaxial has been studied. It is found that electron irradiation increases the electron concentration and band gap energy E_g of InN. The shift of the band gap energy E_g is a manifestation of the Burshtein-Mossa effect.