

Сине-зеленое излучение в полупроводниковых лазерах с квантовыми ямами на основе GaAs

© Н.В. Байдусь, А.А. Бирюков, Б.Н. Звонков[¶], С.М. Некоркин, В.Я. Алешкин^{*¶}

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета, 603950 Нижний Новгород, Россия

* Институт физики микроструктур Российской академии наук, 603600 Нижний Новгород, Россия

(Получена 30 июня 2003 г. Принята к печати 9 июля 2003 г.)

Проведено исследование второй гармоники в полупроводниковых лазерах InGaAs/GaAs/InGaP с квантовыми ямами. Показано, что решеточная нелинейность 2-го порядка коэффициента диэлектрической проницаемости приводит к возбуждению фундаментальной *TM*-моды диэлектрического волновода на удвоенной частоте линии генерации лазера. Наблюдались дополнительные линии генерации около пика второй гармоники.

1. Введение

Возможность широкого применения сине-зеленого излучения в системах оптической записи информации, дисплеях, высокоразрешающей литографии, спектроскопии и медицинской диагностики стимулирует научные исследования по разработке лазеров этого спектрального диапазона. Работа идет в нескольких направлениях: удвоение частоты инфракрасного излучения 850–890 нм в твердотельном кристалле LiTaO₃ за счет нелинейного взаимодействия [1], использование полупроводников A^{II}B^{VI} (ZnSeS/CdZnSe) [2] и A^{III}B^V (GaN/InGaN) [3]. Имеется еще одна возможность получения сине-зеленого излучения на полупроводниках A^{III}B^V — это использование нелинейных свойств лазерных диодов из GaAs. Действительно, величина электрического поля световой волны в резонаторе лазера велика ($\sim 10^4$ В/см), а нелинейная диэлектрическая проницаемость GaAs в 6 раз выше, чем в LiNbO₃. Генерация второй гармоники наблюдалась в лазерах с вертикальным резонатором в работах [4–6]. Имеются публикации о генерации второй гармоники в лазерных диодах полоскового типа на гетероструктуре (In,Ga)As/GaAs с двумя квантовыми ямами и выходом излучения через отверстия в верхнем электроде [7]. В настоящей работе проведено исследование генерации второй гармоники на гетероструктурах InGaAs/GaAs/InGaP с квантовыми ямами. Генерация второй гармоники наблюдалась со сколов структуры, которые служили зеркалами для генерации основной гармоники.

2. Гетероструктуры и изготовление лазеров

Лазерные гетероструктуры InGaAs/GaAs/InGaP выращивались методом МОС-гидридной эпитаксии (газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений) при атмосферном давлении. Лазерные структуры состояли

из следующих слоев: подложка *n*⁺-GaAs, нижний ограничивающий слой *n*-InGaP толщиной 0.7 мкм, волноводный слой *i*-GaAs толщиной 0.8 мкм с активной областью InGaAs, содержащей две квантовые ямы по 9 нм, верхний ограничивающий слой *p*-InGaP и контактный слой *p*⁺-GaAs. Изготавливались лазеры по технологии, описанной в [8]. Лазеры имели длину волны излучения $\lambda = 0.94–0.99$ мкм. Все лазеры имели ширину полоска $w = 100$ мкм, длину резонатора $L = 1$ мм. Диоды монтировались полосковым контактом вниз на медный теплоотвод. Задняя грань лазера имела многослойное отражающее покрытие, передняя — просветляющее покрытие Al₂O₃.

3. Экспериментальные результаты

Измерения проводились при накачке лазера постоянным током. Спектральные характеристики измерялись с помощью решеточного монохроматора МДР-23 при 300 К. Кроме спектральных характеристик были исследованы зависимости интенсивности излучения от угла в плоскостях, перпендикулярной и параллельной *p–n*-переходу, на фиксированных длинах волн (диаграмма направленности).

На рис. 1 показан спектр генерации второй гармоники (кривая 1) и спектр генерации основной гармоники (кривая 2) полупроводникового лазера при токе накачки 1.5 А (мощность основной гармоники 1.1 Вт). Ширина максимума, измеренная на половине высоты, составляет 1 нм для второй гармоники и 3.5 нм для основной полосы.

Для выяснения природы генерации второй гармоники была измерена зависимость ее мощности от мощности основной линии генерации лазерного диода (рис. 2). Из рисунка видно, что эта зависимость квадратичная, и, следовательно, причина генерации — нелинейность 2-го порядка. Для того чтобы установить природу нелинейности, были проведены поляризационные измерения излучения лазера.

Эти измерения показали, что вектор электрического поля второй гармоники перпендикулярен плоскости

[¶] E-mail: zvonkov@nifti.unn.ru

^{¶¶} E-mail: Aleshkin@ipm.sci-nnov.ru

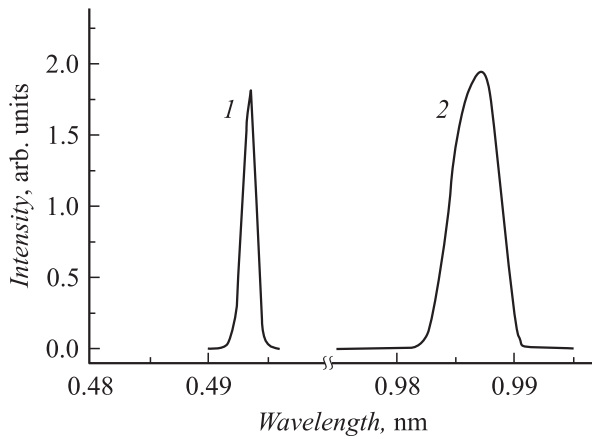


Рис. 1. Спектральная зависимость излучения полупроводникового лазера InGaAs/GaAs/InGaP. 1 — вторая гармоника, 2 — основная гармоника.

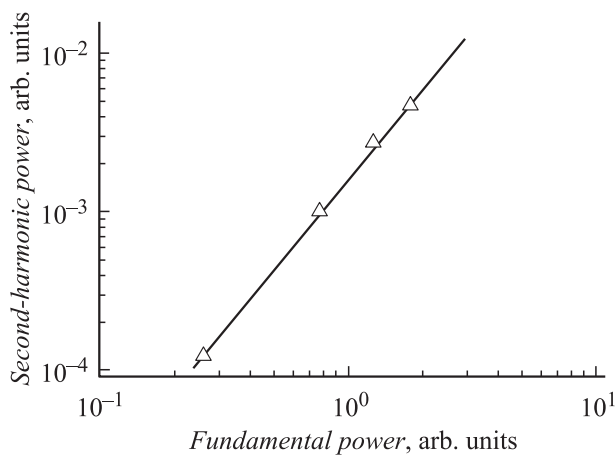


Рис. 2. Зависимость мощности излучения второй гармоники от мощности излучения основного спектрального максимума.

квантовых ям (*TM*-мода). Отметим, что тензор диэлектрической восприимчивости 2-го порядка в материалах со структурой цинковой обманки, обусловленный нелинейностью решетки, $\epsilon_{ijk}^{(2)}$ имеет ненулевые элементы, только когда $i \neq j \neq k$ (оси координат x , y , z выбраны вдоль направлений $[100]$, $[010]$, $[001]$ соответственно, направление роста $[001]$). Поскольку основная мода, генерируемая лазером, является *TE*-модой волновода и распространяется вдоль направления $[110]$, она имеет только x -, y -компоненты электрического поля. Следовательно, электрическое поле второй гармоники, генерируемой за счет решеточной нелинейности, должно быть направлено вдоль оси z (направление $[001]$), что и наблюдается в эксперименте. Это обстоятельство говорит о том, что генерация второй гармоники обусловлена решеточной нелинейностью. Проведенные оценки мощности генерации второй гармоники показали, что отношение мощностей второй и первой гармоник не более 10^{-6} .

Кроме максимума излучения на удвоенной частоте около него наблюдались спутные максимумы излучения, интенсивности которых менялись от образца к образцу. На рис. 3 приведен наблюдаемый спектр генерации, на котором отчетливо видно присутствие 3 дополнительных спутников. Два из них (наиболее мощные) отнесены от основной линии на одинаковую энергию ~ 50 мэВ в коротковолновую и длинноволновую стороны. Отметим, что отношение интенсивности длинноволнового спутника (стоксовой линии) к интенсивности линии второй гармоники составляет примерно 1/30, а к интенсивности коротковолнового спутника (антискотковой линии) — 2. Около стоксовой линии наблюдается еще один слабый спутник. Хорошо известно, что в арсениде галлия энергия оптических фононов не превышает 37 мэВ [9], в InGaP энергии оптических фононов составляют 43 мэВ (InP-подобный фонон) и ~ 47 мэВ (GaP-подобный фонон). Возможно, что генерация спутников происходит благодаря комбинационному рассеянию второй гармоники в InGaP.

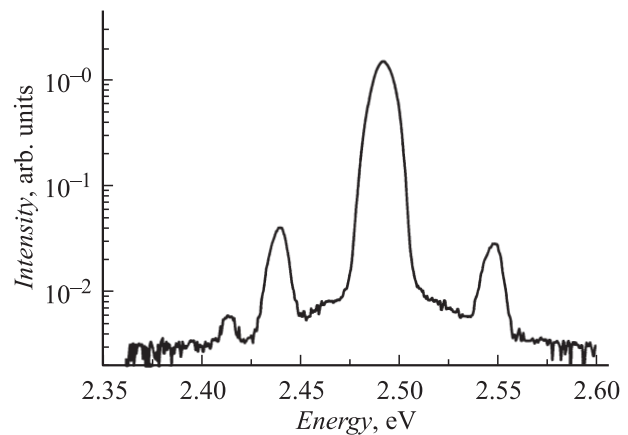


Рис. 3. Спектр генерации второй гармоники полупроводникового лазера, наблюдаемый на некоторых чипах.

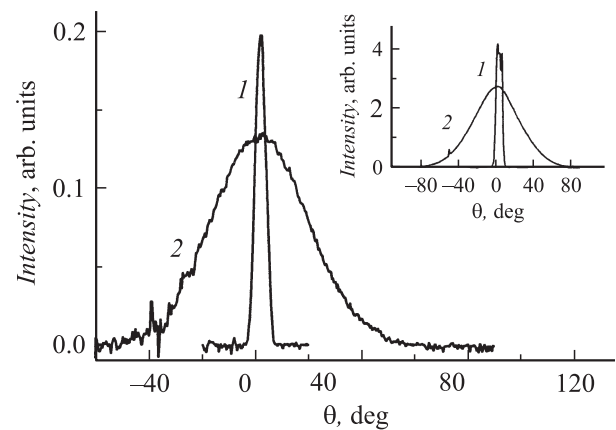


Рис. 4. Диаграммы направленности второй гармоники полупроводникового лазера. На вставке — диаграммы направленности основной гармоники того же лазера. 1 — в плоскости p - n -перехода; 2 — в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу.

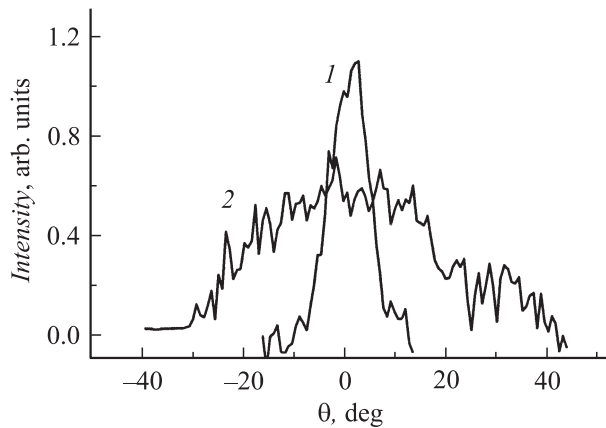


Рис. 5. Диаграммы направленности длинноволнового спутелита (стоксовой линии): 1 — в плоскости p - n -перехода; 2 — в плоскости, перпендикулярной p - n -переходу.

Вероятно, небольшое различие между интенсивностями стоксовой и антистоксовой линий, а также большая интенсивность самих линий указывают на существование большого числа неравновесных оптических фоонов в активной области лазера. Сателлиты в окрестности основной линии генерации лазера обнаружены не были.

На рис. 4 приведены зависимости интенсивности излучения от угла θ в плоскостях, перпендикулярной и параллельной p - n -переходу, для второй и основной гармоник. Диаграмма направленности для второй гармоники похожа на таковую для основной моды и соответствует фундаментальной TM -моды диэлектрического волновода. Это означает, что решеточная нелинейность 2-го порядка коэффициента диэлектрической проницаемости приводит к возбуждению фундаментальной TM -моды диэлектрического волновода на удвоенной частоте. Отметим, что диаграмма направленности излучения стоксовой линии (см. рис. 5) также соответствует фундаментальной моде диэлектрического волновода.

Таким образом, в работе получено экспериментальное подтверждение генерации фундаментальной TM -моды удвоенной частоты основной гармоники в лазере с квантовыми ямами. Установлено, что генерация обусловлена решеточной нелинейностью диэлектрической проницаемости GaAs.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 01-02-16441), РФФИ-БФФИ (грант № 02-02-81036), НАТО (SfP-973799 „Semiconductors“) и МНТЦ (№ 2293).

Список литературы

- [1] K. Yamamoto, K. Mizuuchi, Y. Kitaoka, M. Kato. Appl. Phys. Lett., **62**, 2599 (1993).
- [2] T. Yokogawa, S. Yoshii, A. Tsujimura, Y. Sasai, J. Merz. Jap. J. Appl. Phys., **34**, L751 (1995).
- [3] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku, Y. Sugimoto. Jap. J. Appl. Phys., **35**, L74 (1996).

- [4] D. Vakhshoori, R.J. Fischer, M. Hong, D.L. Sivko, G.J. Zydzik, G.N.S. Chu, A.Y. Cho. Appl. Phys. Lett., **59**, 896 (1991).
- [5] N. Yamada, Y. Kaneko, S. Nakagawa, D.E. Mars, T. Takeuchi, N. Mikoshida. Appl. Phys. Lett., **68**, 1895 (1996).
- [6] Y. Kaneko, S. Nakagawa, Y. Ichimura, N. Yamada. J. Appl. Phys., **87**, 1957 (2000).
- [7] P.A. Ramos, E. Towe. J. Appl. Phys., **69**, 3321 (1996).
- [8] И.А. Авруцкий, Л.М. Батукова, Е.М. Дианов, Б.Н. Звонков, Н.Б. Звонков, Г.А. Максимов, И.Г. Малкина, Л.В. Медведова. Квант. электрон., **21**, 921 (1994).
- [9] J.S. Blakemore. J. Appl. Phys., **53**, 123 (1982).

Редактор Л.В. Шаронова

Blue-green radiation in the quantum well semiconductor lasers based on GaAs

N.V. Baidus, A.A. Biryukov, B.N. Zvonkov, S.M. Nekorkin, V.Ja. Aleshkin*

Physicotechnical Research Institute,
State University of Nizhny Novgorod,
603950 Nizhny Novgorod, Russia
* Institute for Physics of Microstructures,
Russian Academy of Sciences,
603600 Nizhny Novgorod, Russia

Abstract The second harmonic generation has been investigated in quantum well InGaAs/GaAs/InGaP semiconductor lasers. It is shown that second order lattice optic nonlinearity leads to excitation of the TM fundamental mode of dielectric waveguide. Additional lines near second harmonic peak have been observed.