

Особенности температурной зависимости спектральной характеристики диодного лазера с удвоителем частоты генерации

В. В. Близнюк¹, О. И. Коваль¹, В. А. Паршин¹, А. Г. Ржанов^{2,*}, А. Е. Тарасов¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Статья поступила 25.07.2017; Подписана в печать 16.10.2017)

Экспериментально обнаружено, что при изменении температуры окружающей среды от 260 К до 345 К пиковая длина волны спектральной характеристики лазерного диода с удвоителем частоты на кристалле КТР практически не смещается относительно положения, которое она занимала при комнатной температуре. Приводится обоснование этого явления.

PACS: 42.65.Ky

УДК: 621.373

Ключевые слова: удвоитель частоты, спектр излучения лазерного диода, деградация гетероструктуры

ВВЕДЕНИЕ

В современной практике использования лазерных диодов (ЛД) для получения нужной длины волны излучения широко применяется метод удвоения частоты излучения в нелинейном кристалле.

Особый интерес представляют ЛД, излучающие в зелёной области спектра (532 нм), так как они широко используются в системах оптической записи информации, дисплеях, спектроскопии, медицине [1].

В последние пять лет ведутся исследования возможности получения первой гармоники с длиной волны $\lambda = 530\text{--}532$ нм в ЛД с квантово-размерным активным слоем («истинно» зелёные лазеры) на основе InGaN [2, 3]. Необходимое согласование периодов кристаллической решётки подложки GaN и активного слоя InGaN слоёв возможно с помощью полуполярной ориентации подложки — слоя GaN, нанесённого на сапфир.

Технология получения таких слоёв достаточно сложна и ещё не отработана, что не позволяет наладить производство таких лазеров в промышленных масштабах. Сообщается о генерации второй гармоники в инфракрасных лазерах с квантовыми ямами на основе арсенида галлия с вертикальным резонатором и лазерах InGaAs/GaAs/InGaP с двумя квантовыми ямами [4]. Генерацию второй гармоники в такой схеме авторы объясняют решёточной нелинейностью диэлектрической проницаемости GaAs при выполнении условия резонанса, когда энергетические уровни в яме расположены эквидистантно [5]. Уровень мощности и КПД таких лазеров очень низки.

Можно сказать, что в настоящее время лазеры, генерирующие излучение на длине волны 532 нм с использованием удвоителя частоты на нелинейных кристал-

лах, остаются вне конкуренции. Стандартная двухступенчатая схема таких приборов включает в себя ЛД с длиной волны излучения 808 нм; неодимовый лазер, преобразующий излучение ЛД в излучение с длиной волны 1064 нм и удвоитель частоты — нелинейный кристалл, в котором формируется излучение с длиной волны 532 нм [6]. Хорошее согласование пиковой длины волны излучения ЛД с полосой поглощения неодимового лазера из-за ее малой ширины выполняется только в узком диапазоне температур активной области ЛД, когда температурным смещением пиковой длины волны можно пренебречь. Даже незначительное (не более чем на 15 К) повышение температуры активной области приводит к длинноволновому сдвигу спектра излучения ЛД и, как следствие, к значительному уменьшению сечения поглощения излучения ЛД рабочим веществом неодимового лазера. Этим объясняется как сильная температурная зависимость мощности излучения на длине волны 1064 нм, так и невозможность создания мощных источников излучения на длине волны 532 нм, работающих по стандартной схеме. При этом необходимо отметить, что длина волны излучения неодимового лазера от температуры окружающей среды практически не зависит, что обеспечивает постоянство частоты излучения и на выходе нелинейного кристалла. Еще одной причиной ограничения мощности генерации таких приборов является их малый КПД, что обусловлено двойным частотным преобразованием излучения. Требуются десятки ватт электрической мощности для того, чтобы получить 5–10 мВт излучения с длиной волны 532 нм.

Поэтому были разработаны системы, в которых непосредственно ИК излучение ЛД с длиной волны 1064 нм преобразуется в зелёное [7]. Это позволило на порядок повысить КПД таких преобразователей.

В связи с этим практический интерес представляет изучение температурных зависимостей мощности и спектра излучения таких систем, чему и посвящена данная работа.

*E-mail: rjanov@mail.ru

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

Для экспериментов были взяты лазерные модули с длиной волны излучения 532 нм и выходной оптической мощностью 10–15 мВт, собранные по схеме прямого преобразования (удвоения частоты), а также лазерные модули мощностью 150 мВт с длиной волны 1064 нм, которые использовались в качестве источников первичного излучения. В качестве нелинейного кристалла использовался кристалл КТР.

На рис. 1 и 2 изображены спектры излучения лазерного модуля мощностью 15 мВт (длина волны излучения 532 нм) и лазера мощностью 150 мВт (длина волны излучения 1064 нм) при двух значениях температуры окружающей среды: 300 К и 315 К и одинаковых токах накачки — 1.3 порогового значения.

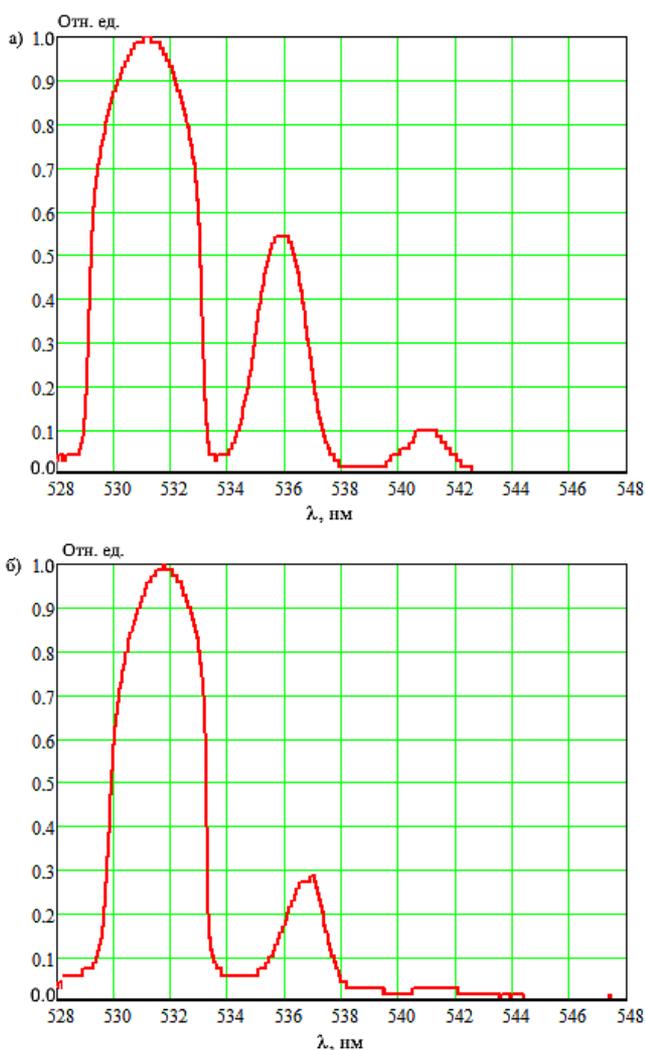


Рис. 1: Спектры излучения лазерного модуля с пиковой длиной волны излучения 532 нм при температурах: а — 300 К; б — 315 К

На рис. 1, а, б видно, что пиковая длина волны излучения лазерного модуля мощностью 15 мВт, работа-

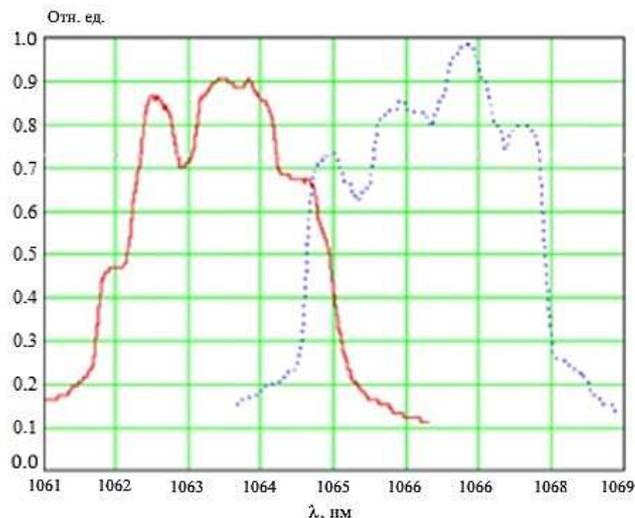


Рис. 2: Спектры излучения лазерного модуля с пиковой длиной волны излучения 1064 нм при температурах: 300 К — сплошная линия; 315 К — пунктирная линия

ющего по схеме с удвоением частоты, при повышении температуры окружающей среды на 15 К не смещается, как и удаленная от нее на 3 нм линия излучения меньшей интенсивности. При этом происходит перераспределение энергии между второй и третьей линиями излучения, в результате чего третья линия исчезает, а интегральная интенсивность излучения не изменяется.

Мощность излучения лазерного модуля с одноступенчатым преобразованием при увеличении температуры окружающей среды на 15 К изменяется незначительно (эти изменения на порядок меньше, чем для лазерных модулей с использованием неодимового лазера по двухступенчатой схеме преобразования). Длина волны излучения в максимуме не изменяется.

На рис. 2 приведены спектры излучения лазера с длиной волны 1064 нм для двух температур окружающей среды. Длинноволновый сдвиг на 3.5 нм соответствует изменению ширины запрещенной зоны активного слоя ЛД.

Спектры были измерены по стандартной методике с помощью установки, схематическое изображение которой приведено на рис. 3.

Далее мы обсуждаем изложенное выше явление и делаем предположения о физических механизмах, его вызвавших.

2. ОБСУЖДЕНИЕ

При удвоении частоты оптического излучения в нелинейном кристалле КТР происходит двухфотонное поглощение света с энергией, превышающей энергию излучательного перехода между энергетическими уровнями в кристалле на 30–70 мэВ. Чем боль-



Рис. 3: Схема установки для измерения спектров лазерных диодов

ше превышение поглощённой энергии от двух фотонов, приходящих от лазера накачки, тем больше фононов генерирует кристалл КТР при стоковом излучении. Тем самым возникают фоновые повторы в излучении. Как показал эксперимент, наблюдается два повтора при комнатной температуре. Линии стоковой люминесценции, как показал эксперимент, оказываются эквидистантными по частоте (рис. 1). Это говорит о том, что в этом процессе участвуют оптические фононы с энергией около 20–25 мэВ. При повышении температуры спектральный максимум излучения лазера накачки смещается в длинноволновую область. Тем самым энергия фотонов, приходящих в кристалл КТР, уменьшается. Это ведёт к тому, что превышение энергии двух поглощённых фотонов над уровнем излучательного перехода в кристалле КТР становится меньше. В результате снижается вероятность двухфонового повтора, и при определённой температуре при излучении происходит генерация только одного фонона (один фоновый повтор). При этом, как показал эксперимент, максимум основной полосы излучения кристалла КТР практически не сдвигается по частоте, а интегральная мощность излучения остаётся прежней. Энергетическое расстояние между основной линией излучения и её фоновым повтором остаётся неизменным, т.е. не меняется энергия фонона. Это характерно для оптических фононов. Можно предположить, что в нелинейном кристалле КТР с сильной поляризацией решётки такие фононы преобладают над остальными и определяют данную температурную зависимость его люминесцентных свойств. Уникальные свойства кристаллов КТР связаны с его кристаллической структурой [8], особенностью которой является наличие тяжёлых атомов титана, смещённых относительно центра элементарной ячейки. Структура кристаллов КТР представляет собой жёсткий трехмерный каркас, образованный из связанных вершинами чередую-

щихся титан–кислородных октаэдров TiO_6 и фосфор–кислородных тетраэдров PO_4 . Соседние TiO_6 октаэдры соединены таким образом, что формируют бесконечные цепи, параллельные кристаллографическим направлениям $\langle 011 \rangle$ и $\langle 0\bar{1}1 \rangle$, которые объединены в каркас тетраэдрами PO_4 . В трёхмерном каркасе имеются широкие винтообразные каналы, в которых размещаются крупные одновалентные катионы калия. Эксперимент по замене титана оловом показал, что интенсивная генерация второй гармоники связана именно с наличием титана в этой структуре [8].

Результаты исследования температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и интенсивности генерации второй гармоники, приведённые в [8], показывают малые температурные сдвиги этих величин в диапазоне температур 260–320 К, что согласуется с результатами наших исследований.

Для объяснения наблюдаемых температурных зависимостей спектров излучения можно привлечь известный эффект (или смещение) Франка–Кондона. Энергия, излучаемая при переходе атомов (как примесных, так и основных атомов решётки) из возбуждённого состояния в основное оказывается меньше, чем энергия, поглощаемая при переходе из основного состояния атома в возбуждённое. Мы предполагаем, что этот эффект позволяет объяснить полученные спектры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали температурную стабильность спектров излучения лазерных модулей с пиковой длиной волны излучения 532 нм, работающих по одноступенчатой схеме преобразования с использованием кристалла КТР, и незначительное изменение мощности при повышении температуры среды на 20 К, в отличие от модулей, работающих по двухступенчатой

схеме с использованием неодимового лазера. Наличие в спектре излучения кристалла КТР фононных повторов и связанного с ними перераспределения энергии излучаемого света между спектральными линиями поз-

воляет сделать вывод о том, что следует ожидать появления «одночастотного» спектра излучения в этом кристалле при температурах свыше 330–350 К.

-
- [1] Yamamoto K., Mizuuchi K., Kitaoka Y., Kato M. Appl. Phys. Lett. 1993. **62**. P. 2599.
[2] Takagi S., Enya Y., Kyono T., Adachi M., Yoshizumi Y., Sumitomo T., Yamanaka Y., Kumano T., Tokuyama S., Sumiyoshi K. et al. Appl. Phys. Express. 2012. **5**. P. 082102.
[3] Rishinaramangalam A.K., Nami M., Fairchild M.N., Shima D.M., Balakrishnan G., Brueck S.R.J., Feezell D.F. Appl. Phys. Express. 2016. **9**. P. 059201.
[4] Карпович И.А., Звонков Б.Н., Левичев С.Б., Байдусь Н.В., Тухов С.В., Филатов Д.О., Горшков А.П., Ермаков С.Ю. ФТП. 2004. **38**, №4. С. 448.
[5] Хачатрян А.Ж., Седракян Д.М., Бадалян В.Д., Хоецян В.А. ФТП. 2007. **41**. С. 67.
[6] Shchegrov A. V., Lee D., Watson J.P., Umbrasas A., Strzelecka E.M., Liebman M.K., Amsden C.A., Lewis A., Doan V.V., Moran B.D. et al. Proc. SPIE. 2003. **4994**. P. 197.
[7] Shchegrov A. V. Proc. SPIE. 2004. **5332**. P. 151.
[8] Сорокина Н.И., Воронкова В.И. Кристаллография. 2007. **52**. С. 82.
-

The temperature dependence features of the spectral characteristic of a diode laser with a frequency doubler

V. V. Bliznyuk¹, O. I. Koval¹, V. A. Parshin¹, A. G. Rzhанov^{2,a}, A. E. Tarasov¹

¹Moscow Power Engineering Institute (National Research University). Moscow 111250, Russia

²Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: ^arjanov@mail.ru

It was experimentally found that when the ambient temperature changes from 260 K to 345 K, the peak wavelength of the spectral characteristic of a laser diode with a frequency doubler on a KTP crystal is practically not shifted relative to the position it occupied at room temperature. The justification of this phenomenon is given.

PACS: 42.65.Ky

Keywords: frequency doubler, laser diode emission spectrum, heterostructure degradation.

Received 25 July 2017.

Сведения об авторах

1. Близнюк Владимир Васильевич — канд. техн. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 362-77-55, e-mail: 4059541@mail.ru.
 2. Коваль Ольга Ивановна — канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент; тел.: (495) 362-77-55, e-mail: kovaloi@mpei.ru.
 3. Паршин Василий Алексеевич — ассистент; e-mail: ParshinVasA@gmail.com.
 4. Ржанов Алексей Георгиевич — канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель; тел.: (495) 939-46-97. e-mail: rjanov@mail.ru.
 5. Тарасов Александр Евгеньевич — ст. преподаватель; тел.: (495) 362-77-55, e-mail: tarasovay01@gmail.com.
-