

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Фемтосекундное сверхизлучение в полупроводниковых лазерах: аномальная внутренняя генерация второй гармоники

П.П.Васильев, А.Н.Путилин, А.Б.Сергеев

Экспериментально обнаружено аномально яркое излучение голубого света при внутреннем удвоении частоты фемтосекундных импульсов сверхизлучения в активной среде полупроводниковых лазерных структур на основе GaAs/AlGaAs-гетероструктур. Эффективность внутренней генерации второй гармоники была более чем на порядок выше, чем в обычном лазерном режиме. Эффект обусловлен возникновением нестационарного упорядоченного состояния электронов и дырок при сверхизлучении, появлением динамических когерентных решеток населенности и периодической модуляции нелинейной восприимчивости среды.

Ключевые слова: сверхизлучение, фемтосекундные импульсы, генерация второй гармоники.

1. Введение

Как хорошо известно, полупроводники, в частности GaAs или InP и твердые растворы на их основе, обладают сильно выраженными нелинейно-оптическими свойствами. Например, нелинейная восприимчивость $\chi^{(2)}$ GaAs на три порядка больше, чем у такого популярного нелинейно-оптического материала, как KDP [1]. Одним из результатов этой нелинейности является генерация второй гармоники (ГВГ) в активной среде полупроводниковых лазеров. Действительно, еще на заре лазерной эры было обнаружено, что ИК лазеры на основе GaAs излучают слабый голубой свет, обусловленный внутренней ГВГ [2, 3]. Интенсивность этого свечения была пропорциональна квадрату мощности основной гармоники P_ω , причем с самого начала было понятно, что из-за огромного поглощения материала на длине волны второй гармоники (ВГ) наблюдаемый голубой свет излучался из области микронного размера вблизи торца лазера. В результате эффективность преобразования $\eta = P_{2\omega}/P_\omega^2$ оказалась чрезвычайно малой (на уровне $10^{-8} - 10^{-10} \text{ Вт}^{-1}$) [2–5].

С другой стороны, режим сверхизлучения (СИ) в полупроводниковых лазерных GaAs/AlGaAs-структурах позволяет генерировать фемтосекундные импульсы с рекордными (до 10^9 Вт/см^2) потоками мощности на длине волны 880–900 нм [6, 7]. Поэтому можно предположить, что гигантская мощность импульсов СИ позволит наблюдать более яркую внутреннюю ВГ, чем в обычном лазерном режиме. Действительно, в экспериментах по СИ наблюдалось довольно сильное голубое свечение из активной области лазерных GaAs/AlGaAs-структур. Однако оказалось, что аномально большая интенсивность вну-

тренней ВГ не может быть объяснена лишь простым увеличением пиковой мощности импульсов СИ.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию генерации внутренней ВГ в режиме сверхизлучения в лазерных GaAs/AlGaAs-структурах. Будет показано, что аномально большая интенсивность ВГ может быть обусловлена совершенно необычными свойствами электронно-дырочной системы. Действительно, как было обнаружено ранее [8–10], в результате квантового фазового перехода при сверхизлучении в электронно-дырочной системе возникает нестационарное когерентное упорядоченное состояние. Конденсация электронно-дырочных пар в фазовом пространстве, возникновение дальнего порядка и динамических решеток населенности приводят к возникновению идеальной пространственной и временной когерентности и к сверхсветовому распространению импульсов [11,12]. Мы продемонстрируем, что эти же эффекты могут обуславливать и аномально большую внутреннюю ГВГ.

2. Эксперимент

Были исследованы два вида GaAs/AlGaAs-гетероструктур с различными конфигурациями активного слоя. Образцы подробно описаны в предыдущей публикации [11]. Все устройства имели трехсекционную геометрию и состояли из двух усиливающих секций у торцов и центральной секции, являвшейся электрически управляемым оптическим поглотителем. Активный слой GaAs толщиной около 0.2 мкм находился между p- и n-слоями AlGaAs. Одна часть образцов имела стандартную прямоугольную активную область шириной 5–6 мкм, а другая часть – расширяющийся от 5 до 40 мкм волновод. Наносекундные импульсы тока с частотой 1–10 МГц подавались на усиливающие секции и в зависимости от амплитуды тока создавали концентрацию электронов и дырок в диапазоне $10^{18} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Запирающее смещение на центральной секции позволяло контролировать величину оптического поглощения в активном слое. Спонтанное излучение и обычная лазерная генерация могли быть получены в структуре при различных уровнях накачки [9].

П.П.Васильев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; Centre for Photonic Systems, University of Cambridge, 9 JJ Thomson Avenue, Cambridge, CB3 0FA, UK; e-mail: peter@lebedev.ru

А.Н.Путилин, А.Б.Сергеев. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: putilinan@sci.lebedev.ru, vnm004@gmail.com

Поступила в редакцию 10 августа 2016 г.

В режиме СИ структуры излучали импульсы длительностью 300–500 фс с пиковой мощностью до 120 Вт и длиной волны в диапазоне 880–890 нм. Каждый наносекундный импульс тока приводил к излучению цуга, содержащего от одного до 12–13 импульсов в зависимости от запирающего напряжения на поглотителе лазера. Динамика излучения исследовалась с помощью фотодетектора с полосой 30 ГГц и стробоскопического осциллографа. Точные измерения длительности импульсов проводились с помощью стандартной интерферометрической автокорреляционной методики. Для наблюдения внутренней ВГ и измерения ее мощности использовались два оптических фильтра с общим коэффициентом пропускания 0.84 и менее 10^{-7} на длине волны второй (440 нм) и первой (880 нм) гармоник излучения соответственно.

На рис. 1 показана фотография колимированного пучка излучения ВГ, зарегистрированного с помощью CCD-камеры.

Голубое излучение регулярно наблюдалось у многих образцов при переходе в режим СИ, причем оно было отчетливо видно в затемненном помещении на белом экране, помещенном в пучок излучения. На рис. 2 представлена типичная зависимость интенсивности ВГ от запирающего напряжения на поглотителе лазерной структуры.

При запирающих напряжениях менее 1–1.5 В структура работает в обычном лазерном режиме. С увеличением напряжения возникает режим СИ, причем мощность фемтосекундных импульсов растет. При достижении определенного напряжения число импульсов СИ в цуге начинает резко падать, а интенсивность ВГ уменьшается (рис. 2).

Экспериментально полученные для разных образцов средние мощности основной и второй гармоник излуче-

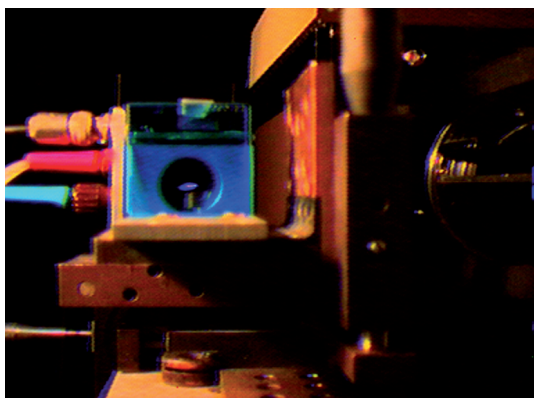


Рис. 1. Фотография пучка второй гармоники.

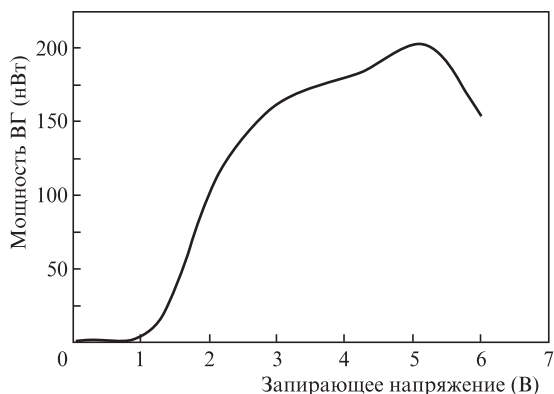


Рис. 2. Типичная зависимость средней мощности второй гармоники от запирающего напряжения.

Табл. 1.

Образец	P_{ω}	$P_{2\omega}$	η (Вт^{-1})
Из [3]	20 Вт	10 мкВт	2.5×10^{-8}
Из [4]	30 мВт	2.6 пВт	2.9×10^{-9}
Из [5]	3.4 мВт	1 пВт	8.0×10^{-8}
H2-51	1.92 мВт	193 нВт	4.7×10^{-6} (5.2×10^{-2})
H2-31	9.2 мВт	104 нВт	1.1×10^{-7} (1.2×10^{-3})
H2-33	9.7 мВт	130 нВт	1.3×10^{-7} (1.4×10^{-3})
H2-52	2.3 мВт	36 нВт	6.2×10^{-7} (6.8×10^{-3})
H2-63	3.4 мВт	43 нВт	3.4×10^{-7} (3.7×10^{-3})
H2-112	3.2 мВт	41 нВт	3.6×10^{-7} (3.9×10^{-3})
H2-131	4.1 мВт	56 нВт	3.0×10^{-7} (3.3×10^{-3})

ния, а также коэффициент преобразования η приведены в табл. 1. Для сравнения приведены экспериментальные данные из [3–5]. В настоящей работе средняя мощность СИ составляла от 1.92 до 9.7 мВт (в зависимости от образца и условий накачки). В табл. 1 коэффициент преобразования η для исследуемых образцов является отношением пиковых мощностей первой и второй гармоник, в скобках – отношением их средних мощностей. Измеренный усредненный коэффициент η составляет $9.0 \times 10^{-7} \text{ Вт}^{-1}$, что более чем на порядок превышает соответствующее значение в лазерном режиме.

3. Обсуждение результатов

Мощность ВГ при внутренней генерации в активной среде GaAs/AlGaAs-гетероструктур можно легко вычислить, поскольку ГВГ хорошо изучена. Интенсивность ВГ в условиях постоянства мощности первой гармоники (как в нашем случае) описывается волновым уравнением [13]

$$\frac{\partial E_{2\omega}}{\partial z} = -\frac{i\omega}{n_{2\omega}c} d_{\text{eff}} E_{\omega}^2 e^{i\Delta kz} - \alpha E_{2\omega}, \quad (1)$$

где d_{eff} – эффективный коэффициент нелинейности; Δk – расстройка волновых векторов; $n_{2\omega}$ – показатель преломления среды на частоте ВГ; c – скорость света; α – коэффициент поглощения на частоте ВГ. Решая уравнение (1), получаем мощность ВГ, которая пропорциональна

$$|E_{2\omega}|^2 \propto \frac{E_{\omega}^4}{\Delta k^2 + \alpha^2} \{[\cos(\Delta kz) - e^{-\alpha z}]^2 + [\sin(\Delta kz)]^2\}. \quad (2)$$

Поскольку $\alpha > 10^7 \text{ м}^{-1}$, интенсивность ВГ насыщается на расстояниях порядка микрона. Для GaAs $d_{\text{eff}} = 2.0 \times 10^{-10} \text{ м/В}$, $n_{\omega} = 3.62$, $n_{2\omega} = 5.04$ и $\alpha = 2.83 \times 10^7 \text{ м}^{-1}$. Решив (1), (2), получим для потока мощности ВГ $I_{2\omega} = \epsilon_0 n_{2\omega} \times |E_{2\omega}|^2/2$ (Вт/м²) выражение

$$I_{2\omega} = \frac{8\pi^2 d_{\text{eff}}^2}{n_{2\omega} n_{\omega}^2 c \lambda_{\omega}^2 \epsilon_0 (\Delta k^2 + \alpha^2)} I_{\omega}^2, \quad (3)$$

где λ_{ω} – длина волны основного излучения; ϵ_0 – электрическая постоянная. Коэффициент пропорциональности в (3) для GaAs составляет $1.93 \times 10^{-20} \text{ м}^2/\text{Вт}$, поэтому в нашем случае (площадь излучающей области равна $2.5 \times 10^{-12} \text{ м}^2$) $\eta = 0.8 \times 10^{-8} \text{ Вт}^{-1}$, что более чем на порядок меньше экспериментально полученного значения.

Физическая причина генерации anomalно яркой внутренней ВГ в режиме СИ в настоящее время до конца не ясна. Одним из наиболее вероятных объяснений этого факта, на наш взгляд, может быть взаимодействие полей как первой, так и второй гармоник с динамическими когерентными решетками населенности [12]. Действительно, решетки населенности с периодом, равным половине длины волны, возникают и в процессе обычной лазерной генерации. Однако амплитуда модуляции электронно-дырочной плотности в этом случае составляет всего лишь несколько процентов от пороговой плотности [14]. В режиме СИ рабочие плотности электронно-дырочных пар в три-четыре раза больше, чем пороговая плотность лазерной генерации [6, 7], причем их глубина модуляции приближается к 100% [14]. Поэтому в лазерном режиме периодическая $\lambda/2$ -модуляция нелинейной восприимчивости $\chi^{(2)}$ весьма незначительна.

В противоположность этому при генерации импульсов СИ когерентные решетки населенности сильно влияют на процесс распространения оптического поля через полупроводниковую среду [12].

С другой стороны, известно, что в полупроводниках вариации электронно-дырочной плотности приводят к значительным изменениям показателя преломления. Поэтому пространственной решетке населенности сопутствует периодическая модуляция показателя преломления и, соответственно, нестационарная пространственная решетка нелинейной восприимчивости. Еще в начале 1970-х годов было обнаружено [15], что периодическая модуляция $\chi^{(2)}$ приводит к повышению эффективности ГВГ по сравнению с эффективностью для пространственно однородной среды. Последующие экспериментальные и теоретические исследования подтвердили значительное увеличение эффективности ГВГ в периодических структурах в различных нелинейных материалах, включая полупроводники, оптические волокна с брэгговскими решетками, фотонные кристаллы и др. [16–18]. Причем даже слабая периодическая модуляция показателя преломления среды ($\Delta n \sim 10^{-2} - 10^{-3}$) может приводить к увеличению эффективности ГВГ более чем на порядок [19]. В случае СИ в GaAs/AlGaAs-гетероструктурах, как было обнаружено ранее [12, 14], динамические когерентные решетки населенности играют существенную роль в динамике СИ, приводя к значительному уменьшению эффективного группового показателя преломления полупроводника и к сверхсветовому распространению фемтосекундных импульсов, а также к сверхбыстрым осцилляциям поляризации среды. Поэтому разумно предположить, что периодическая модуляция нелинейной восприимчивости среды, вызываемая решетками населенности, приводит к сильному увеличению эффективности внутренней ГВГ, наблюдаемому экспериментально. Теоретичес-

кое исследование этого эффекта будет предметом нашей следующей публикации.

4. Выводы

В работе исследована внутренняя ГВГ в режиме сверхизлучения в GaAs/AlGaAs-гетероструктурах. Anomalно яркое голубое свечение было обнаружено во всех образцах при переходе в режим СИ. Обнаружено, что эффективность преобразования во вторую гармонику энергии импульсов СИ более чем на порядок выше, чем в обычном лазерном режиме. Эффект объяснен взаимодействием оптического поля импульсов с нестационарными когерентными решетками населенности. Конденсация электронно-дырочных пар в фазовом пространстве при переходе в режим СИ [8, 9] приводит к возникновению упорядоченного когерентного электронно-дырочного состояния с глубокой $\lambda/2$ -модуляцией плотности носителей и соответствующей модуляцией коэффициента преломления и нелинейной восприимчивости. Такая периодическая модуляция, как было отмечено ранее, может приводить к существенному увеличению эффективности преобразования излучения во вторую гармонику.

Авторы выражают благодарность Х.Кан и Х.Ота за предоставление образцов GaAs/AlGaAs-гетероструктур, а также И.В.Сметанину за многочисленные полезные обсуждения.

1. *Handbook of Laser Technology and Applications*. Webb C.E., Jones J.D.C. (Eds) (Abingdon: Taylor & Francis, 2004).
2. Garfinkel M., Engeler W.E. *Appl. Phys. Lett.*, **3**, 178 (1963).
3. Malmstrom L.D., Schlickman J.J., Kingston R.H. *J. Appl. Phys.*, **35**, 248 (1964).
4. Ogasawara N., Ito R., Rokukawa H., Katsurashima W. *Jap. J. Appl. Phys.*, **26**, 1386 (1987).
5. Kanamori H., Takashima S., Sakurai K. *Appl. Opt.*, **30**, 3795 (1991).
6. Васильев П.П. *Квантовая электроника*, **24**, 885 (1997).
7. Васильев П.П. *Квантовая электроника*, **29**, 4 (1999).
8. Vasil'ev P.P. *Phys Stat Sol. (b)*, **241**, 1251 (2004).
9. Vasil'ev P.P. *Rep. Progr. Phys.*, **72**, 076501 (2009).
10. Vasil'ev P.P., Olle V., Penty R.V., White I.H. *Europhys. Lett.*, **104**, 40003 (2013).
11. Васильев П.П., Пенти Р.В., Уайт И.Х. *Квантовая электроника*, **42**, 1081 (2012).
12. Vasil'ev P.P., Penty R.V., White I.H. *Light: Sci. Applications*, **5**, e16086, (2016).
13. Дмитриев В.Г., Тарасов Л.В. *Прикладная нелинейная оптика* (М: Физматлит, 2004).
14. Vasil'ev P.P., Penty R.V., White I.H. *25th International Semiconductor Laser Conf.* (Kobe, Japan, September 12–15, 2016).
15. Blombergen N., Sievers A.J. *Appl. Phys. Lett.*, **17**, 483 (1970).
16. Nakagawa S., Yamada N., Mikoshiba N., Mars D.E. *Appl. Phys. Lett.*, **66**, 2159 (1995).
17. Scalora M., Bloemer, M.J., Manka A.S., Dowling J.P., Bowden C.M., Vishwanathan R., Haus J.W. *Phys. Rev. A*, **56**, 3166 (1997).
18. Bertolotti M. *J. Opt. A*, **8**, S9 (2006).
19. Haus J.W., Vishwanathan R., Scalora M., Kalocsai A.G., Cole J.D., Theimer J. *Phys. Rev. A*, **57**, 2120 (1998).