

Перестраиваемый источник терагерцового излучения на основе генерации разностной частоты в кристалле GaP

В. Я. Алешкин¹⁾, А. А. Антонов, С. В. Гапонов, А. А. Дубинов, З. Ф. Красильник, К. Е. Кудрявцев, А. Г. Спиваков, А. Н. Яблонский

Институт физики микроструктур РАН
603950 Нижний Новгород, Россия

Поступила в редакцию 17 ноября 2008 г.

На основе генерации разностной частоты в кристалле GaP создан перестраиваемый источник излучения терагерцового диапазона (1–4 ТГц) с шириной линии 12 ГГц. В качестве накачки было использовано излучение импульсного лазера Nd:YAG, генерирующего излучение с длиной волны 1064 нм, и перестраиваемого параметрического генератора света. Излучение генерировалось импульсами с длительностью 10 нс с частотой повторения 10 Гц. Мощность излучения в импульсе была около 15 мВт.

PACS: 42.70.Nq, 42.79.Nv

В настоящее время активно обсуждаются различные пути создания перестраиваемых узкополосных источников терагерцового излучения, работающих при комнатной температуре. Имеющиеся вакуумные источники, такие как лампа обратной волны, с трудом преодолевают частотный рубеж в 1 ТГц, и их мощность быстро падает с ростом частоты в этом диапазоне [1]. Полупроводниковые квантовые каскадные лазеры в терагерцовом диапазоне работают только при криогенных температурах и не обладают возможностью существенной перестройки частоты [2]. Газовые лазеры, хотя и работают при комнатной температуре, также не способны заметно перестраивать длину волны излучения [3]. Источники терагерцового излучения, созданные на основе фемтосекундных лазеров, обладают чрезвычайно широким спектром излучения (порядка 1 ТГц), что не всегда приемлемо для спектрометрических применений [4]. Источники терагерцового излучения на основе полупроводниковых лазерных диодов, работающие при комнатной температуре, были предложены в [5], но пока еще не реализованы. Генерация разностной частоты в терагерцовом диапазоне при использовании в качестве накачки параметрических генераторов света обеспечивает возможность получения достаточно узкополосного и перестраиваемого в широких пределах источника. Обычно в качестве нелинейного кристалла для этих целей используется ниобат лития LiNbO₃ [6]. Однако этот материал обладает довольно большим поглощением в терагерцовом диапазоне, обусловленном фононами, что снижает эффективность генерации разностной частоты [7].

В настоящей работе мы вслед за работой [8] использовали в качестве нелинейного кристалла полупроводник GaP, который обладает рядом преимуществ по сравнению с ниобатом лития. Во-первых, в GaP при генерации разностной частоты в диапазоне 1–4 ТГц с накачкой излучением с длиной волны около 1000 нм фазовый синхронизм выполняется в почти коллинеарной геометрии пучков (направления распространения излучения накачки и разностной частоты почти совпадают). Это обстоятельство делает ненужным использование таких приспособлений, как кремниевые призмы, для вывода из кристалла терагерцового излучения. Во-вторых, фононное поглощение излучения диапазона 1–4 ТГц в GaP существенно меньше, чем в ниобате лития. Поэтому использование полуизолирующих кристаллов (то есть без потерь на свободных носителях) GaP для генерации излучения в этом диапазоне предпочтительнее.

Природа оптической нелинейной восприимчивости второго порядка полярного полупроводника GaP – ангармоничность оптических колебаний решетки, поэтому имеется резонанс нелинейной восприимчивости при воздействии двух волн ближнего ИК диапазона большой амплитуды и разницей частот, лежащей в окрестности частоты поперечного оптического фонона. Зависимость тензора нелинейной диэлектрической проницаемости второго порядка от частот волн, воздействующих на среду, в GaP была рассмотрена в работе [9].

На рис.1 изображена принципиальная схема установки, которая использовалась для генерации излучения разностной частоты. В качестве излучения ближнего ИК диапазона для получения

¹⁾e-mail: aleshkin@ipm.sci-nnov.ru

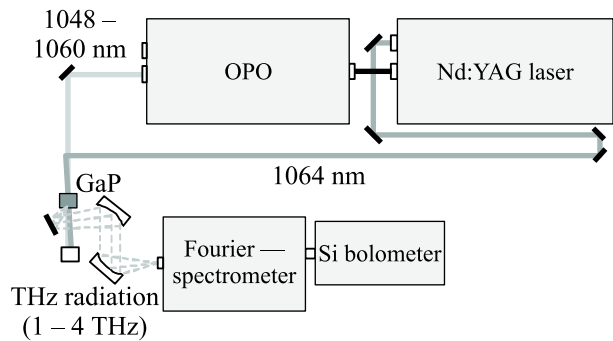


Рис.1. Схема установки для генерации разностной частоты терагерцового диапазона

разностной гармонике использовались: основная гармоника импульсного лазера Nd:YAG (Quanta-Ray PRO-230-10, “Spectra-Physics”; длительность импульса ~ 10 нс, энергия в импульсе ~ 50 мДж, длина волны 1064 нм, ширина линии излучения -0.002 см^{-1}) и излучение параметрического генератора света (optical parametric oscillator, OPO) MOPO-SL (“Spectra-Physics”) с оптической накачкой третьей гармоникой (355 нм) того же лазера Nd:YAG; длина волны 1048–1060 нм, энергия в импульсе ~ 20 мДж. Диаметр обоих пучков составлял ~ 8 мм. Частота повторения импульсов составляла 10 Гц. Длина пути луча основной гармонике выбиралась таким образом, чтобы скомпенсировать временную задержку между импульсами OPO и лазера накачки.

В качестве нелинейного кристалла для получения разностной гармонике использовался кристалл GaP размером $10 \times 10 \times 10$ мм. Нормальными к граням куба являлись следующие кристаллографические направления $[1, -1, 0]$, $[1, 1, 1]$, $[1, 1, -2]$. Грани кристалла, имеющие кристаллографическое направление $[1, -1, 0]$, были отполированы для ввода и вывода излучения. Излучение основной гармонике и излучение OPO заводились в кристалл через одну из полированных граней в направлении, перпендикулярном к ней. Для выполнения условий фазового синхронизма один из лучей отклонялся от нормали на небольшой угол, составлявший несколько десятков минут. Кристалл располагался в специальном держателе, который позволял вращать его в плоскости, перпендикулярной направлению распространения лазерного излучения, для получения максимального сигнала разностной гармонике.

Излучение терагерцового диапазона регистрировалось с помощью кремниевого болетрометра, охлаждаемого жидким гелием. Для записи спектра разностной гармонике использовался фурье-спектрометр Bruker

VERTEX80v, работающий в режиме “step-scan”. Для поглощения рассеянного лазерного излучения использовалась германиевая пластина.

В ходе эксперимента были записаны спектры основной гармонике лазерного излучения и линии OPO (см. рис.2). Для этого использовался фурье-

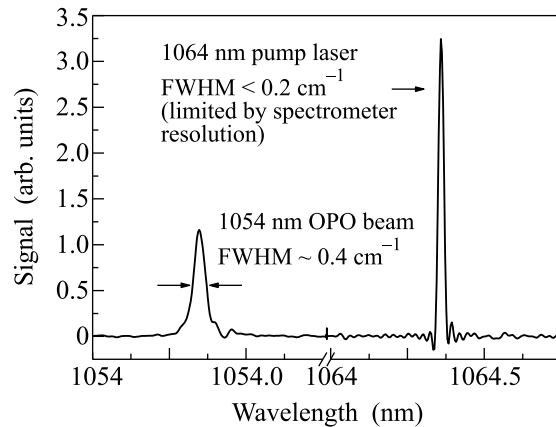


Рис.2. Спектры излучения Nd:YAG-лазера (левый пик) и OPO (правый пик)

спектрометр, а сигнал регистрировался с помощью штатного детектора видимого диапазона на основе кремниевого фотодиода. Ширина линии OPO в диапазоне 1048–1060 нм составила 0.4 см^{-1} и линии генерации Nd:YAG-лазера -0.002 см^{-1} .

Полученное излучение терагерцового диапазона представляло собой узкую линию (см. рис.3), положение которой с хорошей точностью совпадало с раз-

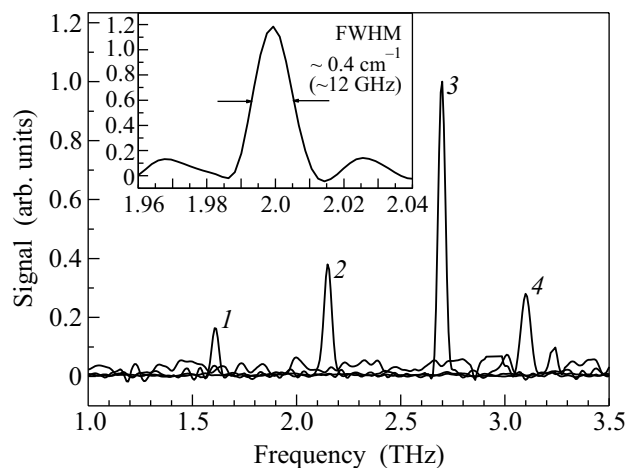


Рис.3. Спектры генерации излучения на разностной частоте. Длина волны Nd:YAG-лазера – 1064 нм, длина волны OPO: 1 – 1058, 2 – 1056, 3 – 1054, 4 – 1052 нм. На вставке изображен спектр линии генерации терагерцового излучения в окрестности 2 ТГц, измеренный с разрешением 0.2 см^{-1}

ностью энергий фотонов излучения ОРО и основной гармоники лазера. Перестройка длины волны разностной гармоники осуществлялась изменением длины волны ОРО и одновременной подстройкой угла между лучами ОРО и основной гармоники лазера накачки. Диапазон перестройки терагерцового излучения составил 1–4 ТГц, что соответствует диапазону перестройки ОРО 1060–1048 нм. Максимальная мощность разностной гармоники наблюдалась на частоте 2.7 ТГц при значении длины волны ОРО 1054 нм. Мощность излучения разностной частоты в импульсе по оценкам составляет порядка 15 мВт. Из рис.3 видно, что ширина линии разностной гармоники составила 0.4 см^{-1} (см. вставку), что практически совпадает с шириной линии излучения ОРО, откуда можно заключить, что ширина линии генерации на разностной частоте определяется спектральной шириной линии излучения ОРО. Отметим, что использованный кристалл GaP был не полуизолирующим, а слаболегированным, что существенно уменьшило эффективность генерации разностной частоты из-за поглощения на свободных носителях.

Максимум на зависимости терагерцового излучения от частоты в области 2.7 ТГц обусловлен минимумом поглощения излучения на разностной частоте в кристалле GaP. При уменьшении частоты ниже 2.7 ТГц потери, связанные с поглощением на свободных носителях, растут. С увеличением частоты выше 2.7 ТГц рост потерь обусловлен частотной зависимостью поглощения на оптических колебаниях решетки GaP. Кроме того, из-за геометрии эксперимента выход из кристалла излучения с частотой больше 5 ТГц невозможен, так как оно распространяется в кристалле под углом, бóльшим угла полного внутреннего отражения.

Таким образом, получена параметрическая генерация терагерцового излучения и измерены его спектральные характеристики, позволяющие констатировать создание импульсного генератора, непрерывно перестраиваемого в диапазоне 1–4 ТГц и шириной линии излучения 12 ГГц, длительностью импульса 10 нс, частотой повторения 10 ГГц, мощностью излучения в импульсе 15 мВт.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты # 07-02-12177-офи, # 08-02-97034-р-поволжье), программы президиума РАН “Электромагнитные волны терагерцового диапазона”, Программы РАН “Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур”, Президента РФ (# МК-3344.2007.2), госконтракта Минобрнауки # 02.518.11.7031.

1. D. Van der Weide, *Optics & Photonics News*. **14** (4), 48 (2003).
2. J. A. Fan, M. A. Belkin, F. Capasso et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 021122 (2008).
3. О. Звелто, *Принципы лазеров*, М.: Мир, 1990.
4. M. Nagai and K. Tanaka, *Appl. Phys. Lett.* **85**, 3974 (2004).
5. В. Я. Алешкин, А. А. Афоненко, А. А. Дубинов, *ЖТФ* **76** (9), 98 (2006).
6. D. J. M. Stothard, T. J. Edwards, D. Walsh et al., *Appl. Phys. Lett.* **92**, 141105 (2008).
7. J. Shikata, K. Karino, T. Taniuchi, and H. Ito, *IEEE Transaction on Microwave Theory and Technology* **48**, 653 (2000).
8. T. Tanabe, K. Suto, J. Nishizawa et al., *J. Appl. Phys.* **93**, 4610 (2003).
9. C. Flytzanis, *Phys. Rev. B* **6**, 1264 (1972).