

ГЕНЕРАЦИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ, ОБЛУЧАЕМЫХ ФЕМТОСЕКУНДНЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

Иванович В.Д. магистрант гр.446801

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь*

Малевич В.Л. – доктор физ.-мат. наук

Аннотация. В настоящей статье дается краткий обзор основных механизмов генерации терагерцового электромагнитного излучения в полупроводниковых структурах, возбуждаемых фемтосекундными оптическими импульсами фемтосекундной длительности. Рассматриваются механизмы формирования импульсов фототока в фотопроводящих антеннах, р-и-п диодах и в приповерхностных областях полупроводника под действием оптического лазерного излучения. Обсуждается также механизм ТГц генерации, основанный на эффекте нелинейного оптического выпрямления в полупроводниковых кристаллах.

Ключевые слова. терагерцовое излучение, р-и-п структура, фотопроводящая антенна, фотоэффект -Дембера, фемтосекундный лазер.

Терагерцовое (ТГц) излучение занимает диапазон частот от 0,1 до 10 ТГц и обладает уникальными свойствами, которые делают его перспективным для приложений в области спектроскопии, биомедицины, систем безопасности и диагностики материалов. Одним из эффективных методов генерации ТГц излучения является использование полупроводниковых структур, облучаемых фемтосекундными лазерными импульсами [1, 2].

Генерация ТГц излучения в полупроводниковых структурах может быть достигнута с помощью нескольких ключевых физических механизмов, каждый из которых основан на взаимодействии фемтосекундных лазерных импульсов с материалами, обладающими определёнными нелинейными и транспортными свойствами.

Фотопроводящая антенна (ФТ) является одним из наиболее часто используемых устройств для генерации и детектирования ТГц электрического поля. Принцип ее работы состоит в генерации носителей тока в результате межзонного поглощения фемтосекундного лазерного излучения и формировании импульса фототока пикосекундной длительности в электрическом поле, создаваемом постоянным внешним смещением, приложенным к металлическим электродам. Амплитуда ТГц электрического поля, возбуждаемого импульсом фототока в дальней волновой зоне, определяется ускорением фотоносителей, т.е. пропорциональна производной от фототока по времени. Поэтому для получения эффективной ТГц генерации в фотоантенне необходимо использовать полупроводниковые материалы с достаточно высокими подвижностями носителей тока и с субпикосекундным временем жизни неравновесных носителей.

На рис. 1 приведен эскиз фотопроводящей антенны и концепция ее использования для генерации ТГц-импульсов. Фотопроводящая антенна состоит из двух металлических электродов, которые нанесены на полуизолирующую полупроводниковую подложку. Поскольку подложка является полуизолирующей, электрическая энергия накапливается в межэлектродной области, как в резервуаре. Фемтосекундные лазерные импульсы, генерируя в межэлектродной области электроны и дырки, действуют как переключатели, открывая резервуар электрической энергии и высвобождая ее в виде ТГц-импульсов. Чтобы генерировать фотоиндуцированные свободные носители в подложке энергия фотонов в возбуждающем оптическом импульсе должна быть выше ширины запрещенной зоны полупроводникового материала. Поляризация электрического поля излучаемой ТГц-волны параллельна напряженности электрического поля, которое перпендикулярно полосковым электродам. Для формирования пучка ТГц излучения используется гиперсферическая линза, изготовленная из тефлона или высокоомного кремния - материалов, слабо поглощающих в ТГц диапазоне частот.

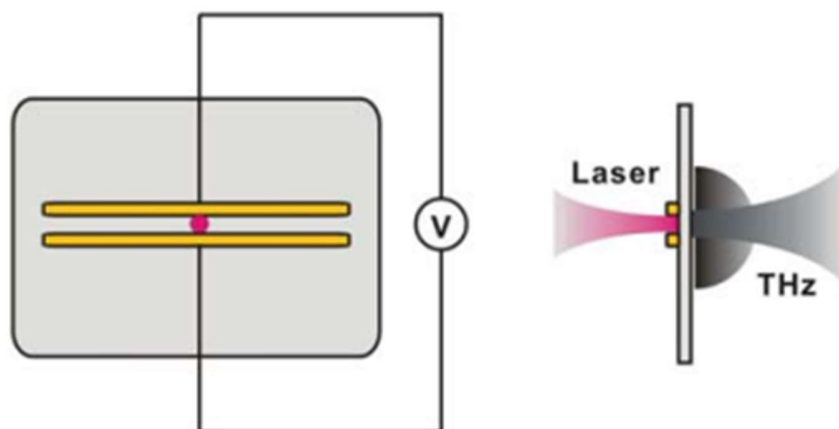


Рисунок 1 - Фотопроводящая антенна (слева) и принцип ее применения для генерации ТГц излучения

Первоначально фотопроводящие антенны создавались на основе специально выращенного GaAs, а для возбуждения использовались фемтосекундные титан-сапфировые лазеры. Однако в последнее время широкое распространение получили фотопроводящие антенны на основе полупроводников с меньшей шириной запрещенной зоны (GaBiAs, InGaAs). Для их фотовозбуждения применяются более дешевые и компактные лазеры, например, волоконные, генерирующие на длине волны 1.55 мкм, а также лазеры на основе иттербий содержащих сред, излучающие на длине волны 1.03 мкм. В настоящее время в фотопроводящих антеннах достигнуты эффективности преобразования оптического излучения в ТГц импульсы на уровне 10^{-3} .

Достаточно эффективная ТГц-генерация может быть получена при облучении поверхностей некоторых полупроводников фемтосекундными лазерными импульсами. Этот эффект наблюдался для самых разных полупроводниковых материалов, в том числе, и обладающих достаточно большими временами жизни фотоносителей. Как и в случае фотопроводящей антенны ТГц излучение обусловлено импульсом фототока, который индуцируется вблизи поверхности полупроводника при фемтосекундном лазерном облучении.

Существует несколько механизмов возникновения фототока, генерирующего импульсы ТГц излучения при фемтосекундном лазерном возбуждении поверхности полупроводника. Субпикосекундный импульс фототока может возникать в результате возбуждения электронов и дырок при межзонном поглощении фемтосекундного лазерного излучения и их пространственного разделения под действием встроенного приповерхностного электрического поля. Такой механизм ТГц генерации реализуется в полупроводниках с сильным приповерхностным изгибом зон, таких, например, как GaAs и InP. В пользу данного механизма свидетельствует противоположная полярность ТГц поля, генерируемого в GaAs n- и p-типа проводимости, которая объясняется разной полярностью обедненного электрического поля в этих образцах.

В узкозонных полупроводниках импульс фототока вблизи облучаемой поверхности может формироваться в результате пространственного разделения фотовозбужденных электронов и дырок,двигающихся вглубь образца с разной скоростью. Как известно, это явление называется эффект Дембера. В условиях стационарного освещения фотоэдс и фототок Дембера обычно малы. Однако при фемтосекундном облучении узкозонных полупроводников энергия фотовозбужденных электронов может значительно превышать тепловую энергию и поэтому фототок, возникающий за счет эффекта Дембера, может быть достаточно большим. В результате формируется дипольный момент, ориентированный перпендикулярно поверхности, который приводит к испусканию ТГц электромагнитного импульса. Этот механизм может реализовываться без применения каких-либо внешних или встроенных электрических полей, что делает его особенно привлекательным для пассивных источников ТГц излучения. Наиболее подходящими материалами для реализации ТГц излучателей на основе эффекта -Дембера являются полупроводники типа InAs, InSb и их соединения, поскольку они обладают высокой подвижностью электронов и малым временем релаксации носителей. Несмотря на простоту реализации, эффективность этого механизма сильно зависит от условий облучения и свойств поверхности кристалла, таких как пассивация, шероховатость и симметрия. На сегодняшний день наибольшая эффективность ТГц

генерации от поверхности полупроводника достигнута в полупроводнике InAs p-типа, облучаемого излучением титан-сапфирового лазера, генерирующего на длине волны 800 нм. ТГц излучатели, использующие эффект генерации от поверхности полупроводников, обладают примерно на порядок меньшей эффективностью по сравнению с фотоантеннами. Однако, благодаря простоте конструкции, а также возможности получать широкоапертурные ТГц пучки, эти излучатели находят практическое применение.

Генерация ТГц излучения может быть получена в p-i-n диодах, возбуждаемых фемтосекундными лазерными импульсами [3, 4]. В этих структурах между n и p-областями формируется слой собственной проводимости (i-область). При подаче обратного смещения в этой области создается электрическое поле с напряженностью, достигающей значений 10^6 В/см. При попадании фемтосекундного лазерного импульса в область i-слоя происходит генерация носителей заряда. Ускоряясь в электрическом поле, носители создают короткий импульс тока, который формирует ТГц излучение. Эффективность преобразования оптического излучения в ТГц импульсы в p-i-n диоде сублинейно растет с увеличением интенсивности возбуждающего излучения и обратного смещения. Передний фронт фототока определяется длительностью возбуждающего оптического импульса, тогда как динамика его заднего фронта контролируется двумя процессами: экранированием встроенного электрического поля и переходами фотовозбужденных электронов в боковые долины зоны проводимости, характеризующиеся меньшей подвижностью электронов. При достаточно больших отрицательных смещениях эффективность ТГц генерации в GaAs p-i-n диоде примерно на порядок превышает эффективность генерации от поверхности InAs, возбуждаемой на длине волны 800 нм.

В p-i-n диодах излучающий диполь ориентирован перпендикулярно поверхности структуры и поэтому большая часть генерируемого ТГц излучения испытывает полное внутреннее отражение. Этот эффект значительно ограничивает эффективность ТГц генерации, как в p-i-n структурах, так и от поверхности полупроводника. Для увеличения выхода ТГц излучения из этих структур используют магнитное поле, которое поворачивает излучающий диполь вдоль поверхности полупроводника. Таким путем удается увеличить выход ТГц излучения примерно на порядок.

Эффект нелинейного оптического выпрямления представляет собой еще один механизм генерации ТГц излучения. Это явление возникает при прохождении фемтосекундного лазерного импульса через нелинейный кристалл, не обладающий инверсной симметрией. Источником ТГц излучения в данном случае является нелинейная поляризация на частоте огибающей лазерного импульса, возникающая под действием электрического поля. Поскольку длительность лазерного импульса может составлять всего несколько десятков или сотен фемтосекунд, спектральная ширина генерируемого ТГц сигнала может достигать нескольких терагерц. Критически важным условием эффективной генерации в этом случае является фазовое согласование между оптической и терагерцовой волной, то есть соответствие групповой скорости лазерного импульса и фазовой скорости ТГц волны в кристалле. Для получения ТГц импульсов методом оптического выпрямления применяются такие материалы, как ZnTe, GaP. Первый из этих материалов эффективно генерирует ТГц излучение при возбуждении на длине волны 800 нм, а второй материал используется на длине волны 1030 нм. В последнее время для генерации ТГц излучения широко применяются органические полупроводники. Эти кристаллы характеризуются большими нелинейными восприимчивостями, а также высокой степенью фазового синхронизма. В ТГц излучателях на основе этих материалов были получены ТГц электрические поля с напряженностью ~ 10 МВ/см.

Различные физические механизмы генерации терагерцового излучения позволяют создавать источники ТГц электромагнитных импульсов под различные задачи, будь то лабораторная ТГц спектроскопия, неразрушающий контроль или получение ТГц изображений. Оптимальный выбор полупроводникового материала и конструкции излучателя зависят от длины волны возбуждающего лазера, желаемой полосы генерации и требуемого уровня мощности ТГц излучения.

Список использованных источников:

1. *Introduction to THz Wave Photonics* / X.-C. Zhang, J. Xu. – Springer, 2010. – 267 p.
2. *Principles of Terahertz Science and Technology* / Yun-Shik Lee. – Springer, 2009. – 340 p.
3. *Terahertz radiation from large aperture Si p-i-n diodes* / L. Xu [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 1991. – V. 59. – No 26. – P. 3357-3359.
4. *Terahertz emission from GaInAs p-i-n diodes photoexcited by femtosecond laser pulses* / I. Nevinskas [et al.] // *Lith. J. Phys.* – 2016. – V. 55. – No 4. – P. 274-278.
5. *THz generation by AlGaAs/GaAs heterostructured p-i-n diode* / V. Trukhin [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2024. – V. 125. – P. 031101 (1-5).

UDC 535.3;621.315.592

GENERATION OF THZ RADIATION IN SEMICONDUCTORS AND SEMICONDUCTOR STRUCTURES IRRADIATED BY FEMTOSECOND LASER PULSES

Ivanovich V.D.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics¹, Minsk, Republic of Belarus

Malevich V.L.– PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This article provides a brief overview of the main mechanisms of generation of terahertz electromagnetic radiation in semiconductor structures excited by femtosecond optical pulses of femtosecond duration. The mechanisms of formation of photocurrent pulses in photoconductive antennas, pin diodes and in the near-surface regions of a semiconductor under the action of optical laser radiation are considered. The mechanism of THz generation based on the effect of nonlinear optical rectification in semiconductor crystals is also discussed.

Keywords. terahertz radiation, p-i-n structure, photoconductive antenna, photo-Dember effect, femtosecond laser.