

УДК 537.862:535.14;535.15

СПЛАВЫ Ti, Ni И TiNi: ГЕНЕРАЦИЯ ИМПУЛЬСОВ ТГц-ИЗЛУЧЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕ В БОЛОМЕТРАХ

© 2019 г. Д. М. Лубенко^{1, *}, В. Ф. Лосев¹, Ю. М. Андреев^{2, 3}, В. В. Денисов¹, В. В. Шугуров¹, Д. М. Ежов³, В. А. Светличный³

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

²Сибирский физико-технический институт имени академика В.Д. Кузнецова при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования “Национальный исследовательский Томский государственный университет”, Томск, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Россия

*E-mail: lubenkodm@gmail.com

Поступила в редакцию 03.09.2018 г.

После доработки 10.09.2018 г.

Принята к публикации 22.10.2018 г.

Исследована генерация ультракоротких импульсов ТГц-излучения в пластинах сплавов Ti, Ni и TiNi в сравнении с генерацией в пластинах Au, Ag, Cu, а также возможность их использования в качестве фоточувствительных материалов болометров. Разработанные источники пригодны для применения в системах мониторинга атмосферы.

DOI: 10.1134/S0367676519030141

ВВЕДЕНИЕ

Терагерцевый (ТГц) диапазон спектра 30–1000 мкм с прилегающей к нему коротковолновой частью миллиметрового диапазона спектра привлекателен для исследования окружающей атмосферы в силу наличия окон прозрачности в спектрах пропускания и находящихся в них непокрытых вращательных линий поглощения газов, слабого поглощения пылевыми аэрозолями и рассеяния аэрозолями различной природы, а также осадками. Особой интерес представляет разработка систем мониторинга абсорбционного типа на основе ультракороткоимпульсных (сверхширокополосных в силу соотношения неопределенностей) источников излучения, работающих в пределах 600–3000 мкм [1]. Сверхширокополосные системы этого диапазона позволяют вести одновременный контроль содержания многих газовых компонентов атмосферы без влияния возмущающего поглощения паров воды. В силу низкой энергии квантов излучения, это излучение безопасно для объектов живой природы и характеризуется высокой проникающей способностью в непроводящие материалы и неполярные жидкости, что позволяет получать изображения скрытых на измерительной трассе объектов.

Известно, что для создания систем контроля содержания малых газовых компонент атмосферы

абсорбционным методом с необходимой для практики чувствительностью необходимо иметь измерительные трассы суб-километровых и километровых длин [2]. Отметим, что оптические свойства атмосферы позволяют создавать системы с измерительными трассами длиной до 10 км [3]. Таким образом, актуальной задачей при разработке систем мониторинга атмосферы в диапазоне 600–3000 мкм является разработка пары устройств: источника излучения с ультракоротким импульсом приемлемой мощности и достаточно чувствительного и быстродействующего детектора излучения.

Важнейшим классом распространенных источников ТГц-излучения являются параметрические преобразователи частоты на основе нелинейных кристаллов с выполнением условий фазового и группового (для преобразования частоты ультракоротких импульсов) синхронизмов, выходные энергетические параметры которых ограничены апертурой имеющихся образцов, невысокой лучевой стойкостью и другими недостатками имеющихся кристаллов [1, 4, 5]. Компактные маломощные ТГц-источники пикосекундной длительности показали применимость в составе систем лидарного типа с субкилометровой (910 м) длиной измерительных трасс, несмотря на чрезвычайно сложную эксплуатацию [6]. Мощные

источники на основе чистых и легированных MgO кристаллов LiNbO_3 генерируют импульсы излучения с энергией до 50 мкДж при максимуме мощности на частоте 0.19 ТГц (~158 мкм), что предположительно достаточно для систем дистанционного мониторинга [1]. Устройства на их основе также отличаются чрезвычайной сложностью в использовании. Важно, что ни одна из созданных систем не продемонстрировала успешного применения в одновременном мониторинге малых газовых компонентов атмосферы, в том числе из-за невысокого отношения сигнал/шум на выходе используемых электрооптических (*freespace*) детекторов излучения.

Привлекательным путем создания мощных источников ТГц-излучения является использование взаимодействия высокоинтенсивного излучения накачки с металлами, показавшие максимально высокую (0.7 мДж) энергию в ультракоротком импульсе генерируемого излучения в тонкой пленке титана [7]. При этом генерация излучения в тонких пленках металлов на прохождении импульса накачки является разовой и требует смены рабочей точки, а генерируемое излучение чрезвычайно широкополосное (0.1–133 ТГц), т.е. имеет низкую спектральную яркость, ограничивающую применение [8].

Генерация ультракоротких импульсов ТГц-излучения с поверхности металлов и полуметаллов путем касательной накачки *P*-поляризованным излучением компактных источников исследована достаточно обстоятельно [9]. Однако возможность их применения в составе систем мониторинга атмосферы наряду с простыми детекторами, работающими при комнатной температуре, не анализировалась.

В данной работе сообщается о детальном исследовании характеристик ультракороткоимпульсных генераторов ТГц-излучения на основе Ti, Ni и сплавов TiNi в сравнении с другими металлами (Au, Cu) с касательной накачкой *P*-поляризованным излучением компактной фемтосекундной лазерной системы, Ti:Sapphire а также возможностей применения резонансного оптико-акустического детектора, работающего при комнатной температуре, как базовых устройств систем мониторинга атмосферы. Исследованы возможности использования Ti, Ni и сплавов TiNi в качестве чувствительных элементов болометров для регистрации ТГц-излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТ

В качестве металлов и сплавов в эксперименте по генерации ТГц-излучения использованы химически чистые Ni, Ti, TiNi и Au, Cu, поставленные производителями в виде пластин толщиной около 2 мм и не подвергнутые какой-либо допол-

нительной обработке. В эксперименте по исследованию возможностей использования Ti, Ni и сплавов TiNi в качестве материала болометров использованы их пленки толщиной 5–10 мкм, полученные раскатыванием. Особое внимание уделено сплаву $\text{Ti}_{50.5}\text{Ni}_{49.5}$, показавшему наибольший отклик при использовании в качестве чувствительного материала болометра, работающего при комнатной температуре, в предшествующем исследовании [10].

В качестве источника накачки в проведенном исследовании по генерации ТГц импульсов служил задающий генератор стартового комплекса “Старт-480М” (Авеста проект, Россия), входящего в состав мультитераваттной системы ТНЛ-100 ИСЭ СО РАН [11]. Задающий генератор комплекса работает следующим образом: фемтосекундные лазерные импульсы генерируются Ti:Sapphire-лазером TiS-20 (Авеста, Россия), работающим на длине волны 950 нм с частотой повторения 80 МГц 50-фс импульсов и средней выходной мощностью 200 мВт. Далее импульсы растягиваются в двухпроходном стретчере до 100 пс и проходят через блок оптической развязки (широкополосный изолятор Фарадея), с помощью ячейки Поккельса выделяются импульсы, следующие с частотой 10 Гц, и инжестируются в регенеративный усилитель, где усиливаются в 10^6 раз. Усиленные импульсы подаются в многопроходный усилитель и далее на выходной компрессор задающего генератора стартового комплекса. На выходе компрессора энергия одиночных 50 фс импульсов поляризованного излучения достигает значений 15–20 мДж. Эти импульсы используются для накачки металлов и сплавов.

В качестве детектора излучения использован резонансный калиброванный оптико-акустический детектор Голея GC-1P (Тидекс, Россия) с оригинальным программным обеспечением и вольтовой чувствительностью $140 \text{ кВ} \cdot \text{Вт}^{-1}$ на частоте 10 Гц.

Возможность детектирования ТГц-импульсов в болометрах на основе Ti, Ni и сплавов TiNi проанализирована в сравнении в идентичных условиях эксперимента при комнатной температуре.

Распределение мощности в поперечном сечении пучка накачки перед падением на исследуемый образец было близким к гауссову. Сфокусированное металлическим зеркалом с фокусным расстоянием 720 мм излучение направлялось на исследуемый образец, установленный в исходном положении под углом α 5° – 20° к нему, в условиях атмосферы лаборатории. Размер типичного пятна излучения накачки на образцах, определенный по измерениям размера пятен ожогов, составлял 9.3×2.4 мм (длина \times ширина), а на входе в детектор – 3.4×1.6 мм. Угол падения варьировался в исследовании для поиска

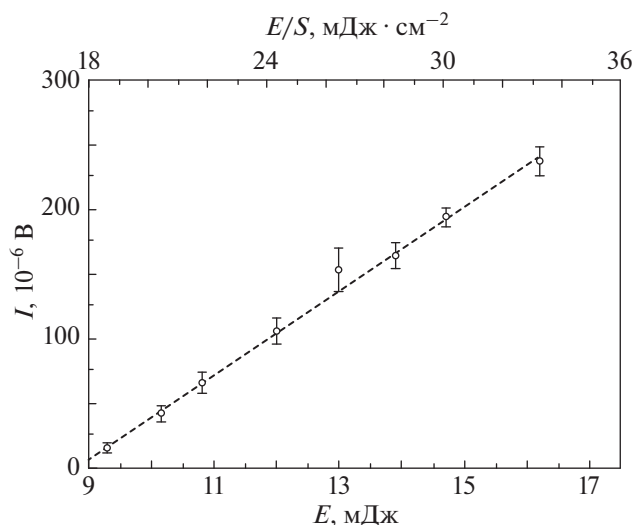


Рис. 1. Зависимость выходного сигнала детектора от энергии лазерного импульса на образце.

оптимального положения образца, обеспечивающего максимальную эффективность генерации ТГц-импульсов.

Для подавления излучения накачки на входе в ТГц-детектор, кроме имеющегося HDPE-фильтра, дополнительно устанавливали тефлоновую пластину толщиной 5 мм, четыре слоя черного полиэтилена общей толщиной 80 мкм и пластину черной бумаги толщиной 0.3 мм, полностью подавляющие сигнал излучения накачки. Регулировка интенсивности накачки производили путем контроля уровня накачки задающего лазера и изменением положения образца относительно фокуса линзы. Для исключения вклада плазмы воздуха в генерируемое ТГц-излучение максимальный уровень накачки устанавливали таким образом, что по визуальному контролю приводил к появлению лишь низкоинтенсивной приповерхностной плазмы. Результаты измерений усреднялись по 500 импульсам накачки, что обеспечило значение среднеквадратичного отклонения не более 4.2%.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Зависимость интегральной энергии импульса ТГц-излучения (сигнала с оптико-акустического детектора) показала линейную зависимость от энергии импульса фемтосекундного лазера для всех исследованных материалов в достаточно широком диапазоне энергий (рис. 1), что облегчило обработку и интерпретацию полученных результатов.

При увеличении энергии импульсов накачки и появлении интенсивной плазмы немедленно выявлялось отклонение энергии генерируемых им-

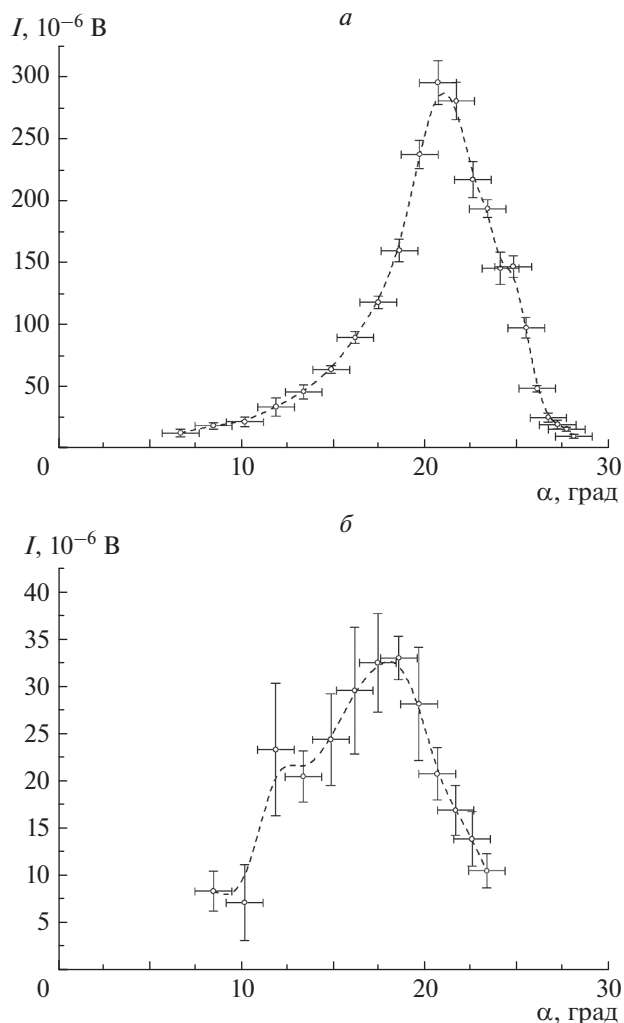


Рис. 2. Угловая зависимость амплитуды ТГц-импульса для образца меди толщиной 0.1 мм на фольгированном стеклотекстолите (а) и бруска никеля толщиной 20 мм (б) на заметном удалении от фокуса линзы при накачке 50-фс импульсами излучения на длине волны 950 нм с энергией 16.2 мДж.

пульсов в большую сторону с увеличением нестабильности уровня сигнала от импульса к импульсу. Типичные зависимости выходного сигнала ТГц-детектора от угла падения излучения накачки на исследуемые пластины показаны на рис. 2.

Сравнение оптимальных угловых положений образцов из различных материалов показало, что они незначительно изменяются от материала к материалу: от 18° у пластинки из Ni, до 20° из Au и 21° из Cu.

Наибольшую стабильность амплитуды генерируемых ТГц-импульсов продемонстрировал образец из золота, после 20000 импульсов накачки показавший изменение амплитуды в пределах погрешности измерений, несмотря на видимый результат абляции на максимальную глубину

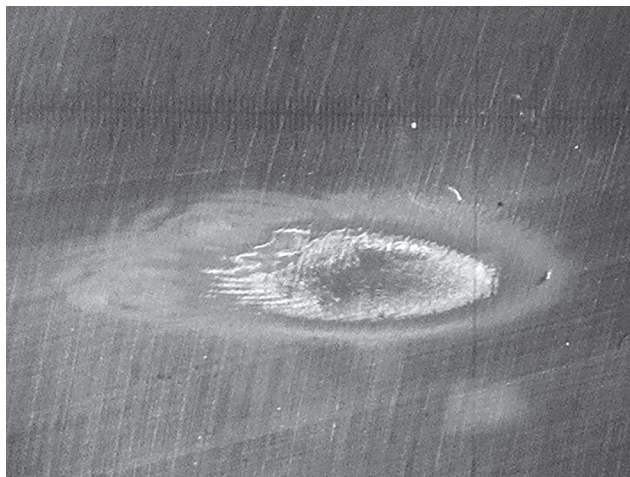


Рис. 3. Вид пятна абляции на никелевой пластине после воздействия 11000 импульсов накачки с энергией 13 мДж.

~100 мкм. Другие материалы продемонстрировали наработку без заметного спада интенсивности генерируемых импульсов после близкого числа импульсов накачки, за исключением образца из меди. Он продемонстрировал радикальный спад амплитуды импульсов в пределах минутного интервала. Предположительно причиной спада является установившееся образование нитрида меди на поверхности. Образование нитрида меди, скорее всего, является и причиной уменьшения угловой расходимости генерируемого ТГц-излучения в плоскости, ортогональной поляризации пучка накачки, на ~30% при идентичной, около 10° , расходимости излучения, полученного в пластинах других материалах. Таким образом, сбор генерируемого разными материалами излучения на чувствительную площадку детектора при использовании фокусирующих линз или без них происходил при исследовании различных образцов практически в идентичных условиях.

В проведенном исследовании установлено, что эффективность генерации ТГц-импульсов пропорциональна проводимости металлов и сплавов и для лучших образцов: Au и Cu превысила эффективность генерации в плазме воздуха. Уровень регистрируемых сигналов легко поднимается до милливольтовой шкалы значений при выборе общего квазиоптимального положения этих образцов относительно фокуса линзы. Отношение сигнал/шум на выходе детектора при их регистрации (линейный режим, отсутствие вклада плазмы) в генерируемое ТГц-излучение находится в пределах от одной до четырех тысяч при минимальном значении регистрируемого сигнала с отношением сигнал/шум = 1, равном пяти мкВ. Это отношение сигнал/шум гораздо выше, чем в измерителях с выносным детектором на расстоянии 110 м на

основе нс-источников ТГц-излучения [5] и говорит о возможности создания абсорбционных измерителей газового состава атмосферы на основе разработанных источников и используемого оптико-акустического детектора (работающего при комнатной температуре) с трассами километровой длины.

Типичный вид пятна абляции на никелевой пластинке показан на рис. 3. Наибольшая глубина абляции характерна для центральной части пятна. Равномерная абляция поверхности пластины на глубину до 1 мм при ортогональном падении лазерного пятна не показала при дальнейшем ее использовании в качестве генератора ТГц-импульсов заметного спада в эффективности генерации. Это указывает на основную причину некоторого уменьшения эффективности генерации со временем при скользящей накачке исследуемых образцов — расстройку оптического тракта регистрации из-за неоднородности пятна абляции по глубине. Дополнительная подстройка в значительной степени нивелирует потерю эффективности.

В отличие от остальных материалов, пластина из меди, наоборот, продемонстрировала резкий спад эффективности в течении минутного интервала времени, предположительно, из-за образования нитрида и/или оксида меди на поверхности. Ее можно использовать для генерации в атмосфере инертных газов или вакууме. Остальные материалы демонстрируют медленный спад эффективности в силу вызванной абляцией расстройки оптического тракта.

Поскольку эффективность генерации ТГц-импульсов оказалась в рассматриваемом методе генерации пропорциональна проводимости металлов и сплавов, эффективность генерации в пластинах Ni, Ti и TiNi указанным методом оказалась на уровне эффекта, т.е. гораздо ниже, чем в образцах для сравнения.

Тонкие фольги образцов Ni, Ti и TiNi (5–10 мкм), полученные раскатыванием, исследовали на предмет возможности использования в качестве генераторов ТГц-излучения с накачкой на “просвет” [8] и фоточувствительных материалов болометров, работающих при комнатной температуре.

Генерация в пленках Ti оказалась наиболее эффективной по отношению к пленкам других материалов, но нестабильной из-за разового режима работы по выбранной рабочей точке на поверхности пленки, различия толщин пленок от точки к точке и заметной, до 10–20%, нестабильности амплитуды импульсов накачки. Амплитуда регистрируемых сигналов не превышала амплитуду сигналов, полученных первым методом генерации, в силу смещения максимума в спектре генерации в коротковолновую сторону (что следовало из визуальных наблюдений), который отсекался

фильтрами при детектировании. В целом этот метод генерации не позволил создать простые и надежные генераторы импульсов ТГц-излучения и вряд ли пригоден для создания приемлемых для практики систем мониторинга атмосферы.

Исследование возможностей применения тонких фольг в качестве чувствительных элементов болометров проводили по методике исследования возможностей применения пластинок толщиной ~100 мкм в предшествующем исследовании [10]. Вновь подтверждено, что лучший материал для болометров должен характеризоваться не только высоким температурным коэффициентом сопротивления, но и высоким значением удельного электросопротивления, минимальной удельной теплоемкостью и плотностью. Из полученных данных следует, что наилучшую потенциальную чувствительность имеют пленки сплава $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$. Уверенно обнаружить количественное различие отклика тонких 10 мкм фольг и 100 мкм пластин не удалось. Возможно оно проявляется при меньшей толщине образцов или при использовании радикально различных технологий изготовления: напыления, раскатывание на воздухе и в атмосфере инертных газов и т.д. Изготовленные болометры на два с лишним порядка менее чувствительны, чем используемый резонансный оптико-акустический детектор, но имеют высокие эксплуатационные характеристики и пригодны для применения в составе систем непрерывного мониторинга, например, солнечной активности или технологических режимов, где не требуются пороговые измерения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследована генерация ультракоротких импульсов ТГц-излучения в пластинах сплавов Ti, Ni и TiNi в сравнении с генерацией в пластинах Au, Cu при касательной накачке *P*-поляризованными и ортогонально падающими на поверхность фемтосекундными импульсами накачки Ti:Sapphire-лазера, а также возможность использования этих металлов и сплавов в качестве фоточувствительных материалов болометров. Установлено, что эффективность генерации при касательной накачке пропорциональна проводимости материалов. Наилучшие результаты по эффек-

тивности (регистрация ТГц-сигналов оптико-акустическим детектором с отношением сигнал/шум = 1000–4000 в зависимости от мощности импульсов накачки) и надежности работы (до 20000 импульсов без ее заметного спада) получены при использовании пластины Au. Высокая эффективность генерации в пластине Cu резко спадала за минуту, предположительно из-за образования нитрида или оксида меди на поверхности. Разработанные источники этого типа пригодны для применения в системах мониторинга атмосферы. Самая эффективная генерация с накачкой на “просвет” получена в тонкой фольге Ti, однако является разовой для каждой локальной точки и нестабильной, с невысокой спектральной яркостью из-за большой спектральной ширины генерируемого излучения, а в итоге непригодной для прикладных систем мониторинга атмосферы. Пленки $Ti_{50.5}Ni_{49.5}$ в качестве фоточувствительного материала болометров показали наилучшую чувствительность, которая на два с лишним порядка меньше, чем у используемого резонансного оптико-акустического детектора Голея GC-1P (Тидекс, Россия).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Stepanov A.G., Henin S., Petit Y. et al.* // Appl. Phys. B. 2010. V. 101. P. 11.
2. *Hinkley E.D. (Ed.)* // Laser Monitoring of the Atmosphere. 1976. 369 p.
3. *Ding Y.J., Shi W.* // Laser Phys. 2006. V. 16. № 4. P. 562.
4. *Vicario C., Monoszlai B., Hauri C.P.* // Phys. Rev. Lett. 2014. V. 112. Art. no. 213901.
5. *Huang Z.-M., Huang J.-G., Zhou W. et al.* // IEEE Conf. Public., IRMMW-THz. 2017. 27 August–1 September. Cancun, Quintana Roo, Mexico. P. 1.
6. *Kim G.-R., Jeon T.-I., Grishkowsky D.* // Optics Express. 2017. V. 25. № 21. P. 25422.
7. *Hoffmann M.C., Fülöp J.A.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2011. V. 44. Art. no. 083001.
8. *Gopal A., Singh P., Herzer S. et al.* // Opt. Lett. 2013. V. 38. P. 4705.
9. *Mironov V.A., Oladyshkin I.V., Fadeev D.A.* // Quantum Electron. 2016. V. 46. P. 753.
10. *Vybornov P., Andreev Yu.* // IEEE Sensors J. 2016. V. 16. P. 6155.
11. *Alekseev S.V., Aristov A.I., Grudtsyn Ya.V. et al.* // Quantum Electron. 2013. V. 43. № 3. P. 190.