

## ЛАЗЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

УДК 621.373:535+535.218

### ЛАЗЕРНАЯ НАКАЧКА В СХЕМЕ $M_x$ -МАГНИТОМЕТРА

© 1995 г. Е. Б. Александров\*, М. В. Балабас\*, А. К. Вершовский\*, А. Э. Иванов\*,  
Н. Н. Яacobсон\*, В. Л. Величанский\*\*, Н. В. Сенков\*\*

\* Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова, 199034 Санкт-Петербург, Россия

\*\* - Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 117924 Москва, Россия

Поступила в редакцию 28.07.94 г.

Работа посвящена созданию монохроматических источников излучения на базе инжекционных лазеров, предназначенных для оптической накачки паров щелочных металлов в задачах квантовой магнитометрии. Описана конструкция одномодового инжекционного лазера с внешним резонатором, стабилизированного по резонансу насыщенного поглощения в  $D_1$ -линии атома К; приведены результаты исследования флуктуационных характеристик излучения стабилизированного лазера с внешним резонатором. Приведены результаты исследований эффективности лазерной накачки паров  $^{39}\text{K}$ . В результате работы продемонстрирована высокая эффективность лазерной накачки по сравнению с традиционными методами накачки; благодаря применению лазерной накачки достигнуто рекордное значение чувствительности магнитометрического датчика ( $1.8 \times 10^{-15} \text{ Т Гц}^{-1/2}$ ). Показано, что в диапазоне интенсивностей, необходимых для оптической накачки  $^{39}\text{K}$ , амплитудные флуктуации лазерного излучения могут быть сведены к дробовым.

#### ВВЕДЕНИЕ

Создание монохроматических источников излучения на базе инжекционных лазеров, стабилизированных по узким атомным реперным линиям [1 - 3], представляет несомненный интерес для задач оптической накачки паров щелочных металлов [4 - 8]. Такие источники излучения должны найти применение как в области квантовой магнитометрии, так и в области стабилизации частоты, где они смогут заменить используемые в настоящее время газоразрядные лампы (лампы Белла-Блюма). Естественно ожидать, что использование лазерных источников излучения, существенно превосходящих газоразрядные лампы как по монохроматичности излучения, так и по спектральной яркости, позволит не только повысить эффективность накачки в уже существующих схемах, но и реализовать новые схемы оптической накачки. В качестве примера можно привести схему магнитометра на сверхтонкой структуре (СТС) атомов калия [9], применение лазера в которой позволит значительно увеличить эффективность накачки уровней СТС, разнесенных всего на 460 МГц.

Применение инжекционных лазеров в качестве источников оптической накачки подразумевает предъявление определенных требований к характеристикам их излучения. Так, поскольку в схемах с оптической накачкой и регистрацией резонанса принципиально ограничивающим чувствительность фактором являются шумы регистрирующего света (который, как правило, одновременно осуществляет оптическую накачку),

амплитудные флуктуации лазерного излучения не должны превосходить дробовые шумы света данной интенсивности (газоразрядные лампы, как правило, удовлетворяют этому требованию).

Далее, длина волны генерации лазера должна быть привязана к линии поглощения накачиваемого вещества. Требования к точности привязки могут варьироваться в зависимости от задачи и, как правило, определяются необходимостью 1) обеспечить максимальную эффективность лазерной накачки, максимизировав интеграл перекрытия спектра излучения с линией поглощения; 2) минимизировать штрафковские сдвиги измеряемого перехода, возникающие под действием света накачки (световые сдвиги).

Обе эти задачи практически невозможно решить с применением традиционных источников накачки (газоразрядных ламп), так как, во-первых, спектр их излучения, как правило, существенно шире доплеровского контура линии поглощения (и, более того, состоит из целого ряда линий, причем часть из них оказывает на накачку разрушающее действие) и, во-вторых, форма этого спектра неконтролируемым образом зависит от параметров разряда. Применение же для оптической накачки лазера, стабилизированного по атомной линии поглощения, позволяет удовлетворить оба этих требования. Стабилизация лазера при этом может осуществляться как по центру доплеровской линии поглощения атома, так и по резонансам насыщенного поглощения. Последний вариант представляется более предпочтительным, поскольку резонансы насыщенного

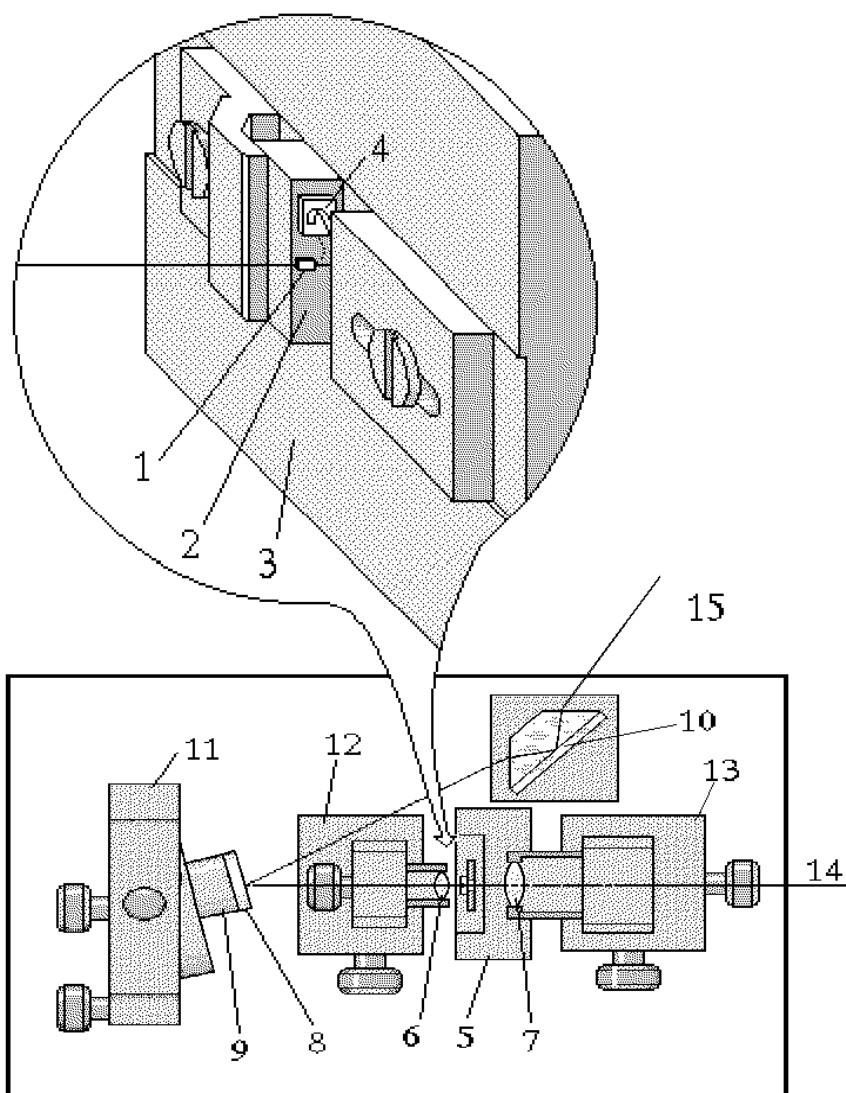


Рис. 1. Лазер с внешним резонатором. 1 - лазерный диод, 2 - медная подложка, 3 - радиатор, 4 — контактная площадка, 5 - охлаждающий элемент, 6, 7 - собирающие линзы, 8 - зеркало с просветляющим покрытием, 9 - пьезокерамика, 10 - дифракционная решетка, 11 - блок крепления зеркала, 12, 13 - блоки крепления объективов, 14, 15 - выходные пучки.

поглощения могут иметь ширину на два порядка меньшую, чем доплеровская ширина линии практически при том же контрасте (отношении сигнал/шум).

В статье описана конструкция одномодового инжекционного лазера с внешним резонатором, стабилизированного по резонансу насыщенного поглощения в  $D_1$ -линии атома К; приведены результаты исследования флуктуационных характеристик излучения стабилизированного лазера с внешним резонатором; приведены результаты исследований эффективности лазерной накачки паров  $^{39}\text{K}$ .

## ИНЖЕКЦИОННЫЙ ЛАЗЕР С ВНЕШНИМ РЕЗОНАТОРОМ

Конструкция полупроводникового лазера с внешним резонатором, созданного на базе разработки ФИРАН (рис. 1), позволила обеспечить достижение требуемых параметров лазерного излучения, а именно: стабильность частоты в пределах  $\pm 5$  МГц; способность к настройке на линию поглощения и к перестройке внутри нее; выходная мощность не менее 1 мВт в одномодовом режиме; шумы интенсивности (амплитудные шумы) на уровне шумов обычного источника света (дробовых шумов).

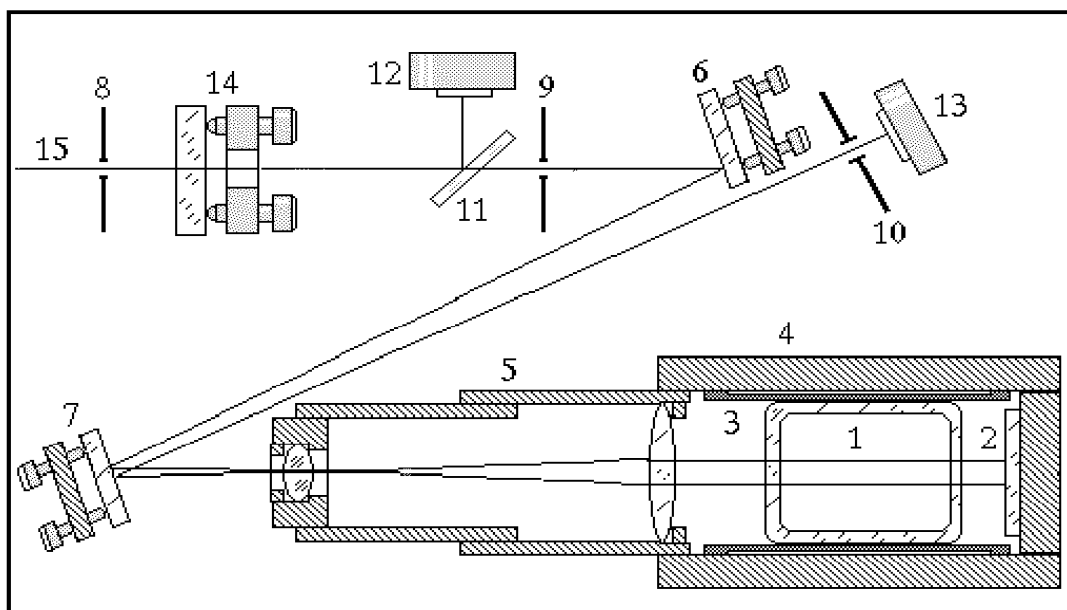


Рис. 2. Оптическая схема стабилизации диодного лазера. 1 - ячейка с парами К, 2 - зеркало, 3 - нагреватель, 4 - термостат, 5 - расширяющий телескоп, 6, 7 - зеркала на юстировочных подвижках, 8 -10 - диафрагмы, 11 - светоделительная пластинка, 12,13 - фотодиоды, 14 - интерференционный фильтр, 15 - выходной пучок лазера.

Собственно лазерный диод представляет собой гетероструктуру Ga-As с лазерным каналом 400 x 5 x 1 мкм; кристалл имеет отражающее покрытие на задней грани и просветляющее на передней. Это позволяет использовать заднюю грань кристалла в качестве одного из зеркал резонатора. Кроме задней грани лазерного кристалла элементами резонатора являются зеркало 8 и голографическая дифракционная решетка 10, работающая в автоколлимационном режиме. Решетка приклеена к стеклянной призме, жестко укрепленной на плите основания лазера. Подстройка резонатора осуществляется поворотом и смещением зеркала 8. Широкодиапазонное сканирование частоты (до 30 нм) осуществляется поворотом зеркала с помощью юстировочного винта и соответственно изменением угла падения луча на решетку; перестройка частоты в пределах аппаратной функции решетки осуществляется посредством пьезокерамики 9.

Плита основания лазера сделана из ситалла - материала с нулевым температурным коэффициентом расширения. Температура лазерного диода контролируется терморезистором и управляется охлаждающими элементами 5.

Блок электроники лазера содержит схему контроля температуры, схему захвата и стабилизации частоты и высокостабильный малошумящий источник тока питания лазерного диода ( $I_{out} - 0 \div 200$  мА,  $\Delta I_{out}/I_{out} = 10^{-6}$ ).

Оптическая схема стабилизации диодного лазера показана на рис. 2. Фактически она представляет собой простой спектрометр насыщенного поглощения. Основными элементами схемы являются ячейка 1 с парами К, расширяющий телескоп 5, зеркала 2, 6, 7 и фотодиоды 12, 13. Ячейка 1 помещена в термостат 4 с нагревателем 3, служащим для достижения необходимого давления паров в ячейке. Лазерный луч проходит через ячейку в двух направлениях, обеспечивая наблюдение двойного резонанса насыщенного поглощения: луч, проходящий в одну сторону, является насыщающим, а в другую - регистрирующим. Телескоп 5, расширяющий пучок в ~10 раз, позволяет, с одной стороны, пропорционально уменьшить угол между встречными лучами и, с другой стороны, увеличить время взаимодействия атома со светом. Таким образом, благодаря телескопу удастся одновременно уменьшить пролетное уширение, геометрическое уширение и избежать уширения мощностью светового пучка.

Фотодиод 13 предназначен для наблюдения резонансов насыщенного поглощения. Вычитая из сигнала на фотодиоде 13 сигнал на фотодиоде 12, можно получить разностный сигнал, не содержащий следов перестроечной характеристики лазера.

Спектр насыщенного поглощения в  $^{39}\text{K}$  содержит ряд узких резонансов [10, 13], причем положение наиболее контрастного резонанса в серии практически точно совпадает с центром доплере-

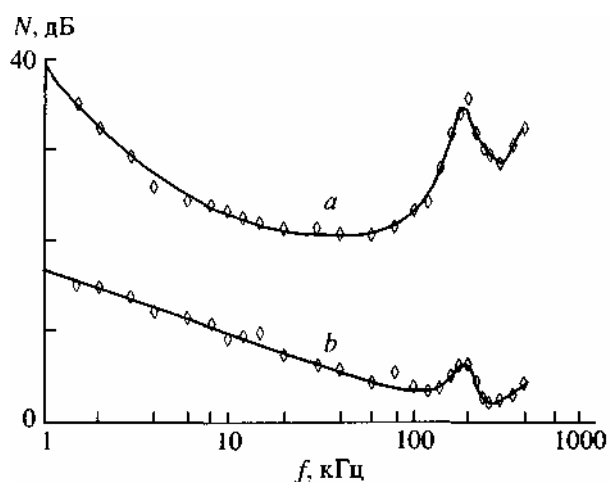


Рис. 3. Спектральное распределение флуктуации интенсивности излучения диодного лазера, *a* - с транзисторным стабилизированным источником постоянного тока, *b* - с пассивной стабилизацией источника постоянного тока.

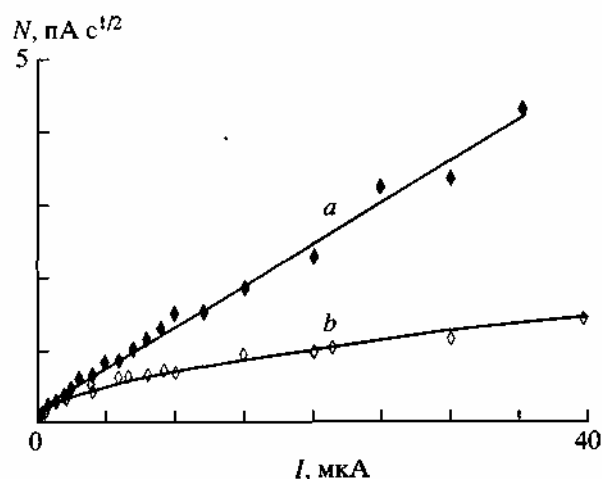


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной амплитуды шумов интенсивности излучения  $N$  от интенсивности света  $I$ . *a* - лазер, *b* - лампа.

ровского контура. Этот резонанс использовался для стабилизации частоты лазера. Сигнал ошибки, вырабатываемый в системе в результате частотной модуляции лазерного излучения (частота модуляции 15 кГц, девиация 1-5 МГц), детектировался и после усиления использовался для управления пьезокерамикой 9 (рис. 1).

### СПЕКТРАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ШУМОВ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Как было отмечено выше, блок электроники лазера содержит источник постоянного тока с флуктуациями интенсивности, не превышающими  $10^{-6}$ . На рис. 3 приведены результаты исследова-

ний спектра флуктуации интенсивности лазерного излучения в диапазоне частот 1 - 500 кГц. Исследование спектра амплитудных флуктуаций проводилось посредством синхронного детектирования сигнала с фотоприемника, на который отщеплялась часть излучения лазера, так что фототок составлял  $I_{\phi} = 20$  мкА. Полоса синхронного детектора составляла 0.15 Гц ( $\tau = 1$  с); сканирование частоты осуществлялось перестройкой опорного генератора. Амплитуда шумов приведена в децибелах по отношению к дробовым шумам идеального источника света при той же интенсивности.

Из рис. 3 видно, что при данной интенсивности света шумы превышают дробовые на 20 - 40 дБ. Здесь нужно пояснить, что указание интенсивности имеет первоочередное значение, так как амплитуда избыточных шумов лазерного излучения пропорциональна интенсивности света на фотоприемнике, тогда как амплитуда дробовых шумов пропорциональна корню из интенсивности света. Следовательно, приведенное нами на рис. 4 отношение шумов лазера к дробовым с изменением интенсивности света меняется пропорционально корню из интенсивности света (т.е. на 10 дБ при изменении интенсивности в 10 раз).

Для устранения избыточных флуктуаций лазерного излучения мы применили пассивную стабилизацию источника тока лазера с помощью RC-фильтра. Результаты пассивной фильтрации тока питания лазера показаны на рис. 4, кривая *b*. Очевидно, что с помощью пассивной фильтрации избыточные флуктуации лазерного излучения удается подавить практически полностью (до  $2 \div 5$  дБ по отношению к дробовым в диапазоне сотен килогерц). Пик в шумовом распределении на частоте 180 кГц также подавляется фильтрацией и соответственно также имеет электротехническое происхождение.

### ЗАВИСИМОСТЬ ШУМОВ ОТ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Нами была проведена серия экспериментов по исследованию эффективности лазерной накачки в схеме калиевого Мх-магнитометра на узкой изолированной линии.

В общем случае шумы лазерного излучения представляют собой результат сложения двух некоррелированных процессов - избыточных и дробовых флуктуаций, и исследование их зависимости от интенсивности света позволяет, с одной стороны, определить диапазон применимости лазера в качестве источника излучения и, с другой стороны, сформулировать требования к источнику питания как к основному источнику избыточных шумов.

На рис. 4, 5 представлены зависимости амплитуды шумов лазера от интенсивности света. На рис. 4, *b* для сравнения приведены амплитуда шумов газоразрядной лампы (ромбики на рис. 4, *b*) и теоретическая зависимость амплитуды дробовых шумов (в полосе 0.15 Гц,  $\tau = 1$  с) от интенсивности света (сплошная линия на рис. 4, *b*). На рис. 5 представлен результат разложения амплитудных шумов лазера (кривая *a*) на избыточную (кривая *b*) и дробовую (кривая *c*) составляющие. Из рисунка видно, что при интенсивностях, меньших чем 4 мкА, избыточные шумы лазерного излучения составляют  $1.1 \times 10^{-7}$  в полосе 0.15 Гц, и их вклад в общий шум лазерного излучения не превышает 40%.

### ЛАЗЕРНАЯ НАКАЧКА АТОМОВ $^{39}K$

Нами была проведена серия экспериментов по исследованию эффективности лазерной накачки в схеме калиевого  $M_x$ -магнитометра на узкой изолированной линии [11, 12]. Реализация узкой линии требует ограничения интенсивности накачки, что хорошо согласуется с условиями подавления избыточных шумов лазера.

Исследования проводились в стабилизированном магнитном поле 0.5 Э в стандартной однолучевой  $M_x$ -схеме наблюдения двойного радиооптического резонанса в зеемановской структуре сверхтонкого подуровня  $F = 2$  основного состояния атомов К. Частота переменного магнитного поля медленно сканировалась в окрестности резонанса. Сигнал радиочастотной модуляции света накачки, прошедшего кювету с парами калия, подвергался синхронному детектированию. Измерялись ширина и амплитуда линии резонанса в сопоставлении с уровнем шумов. Для передачи света в кювету применялся длинный световод, позволявший оперативно менять ламповое возбуждение на лазерное.

В этих условиях мы имели возможность корректно сравнить эффективность лазерной накачки с эффективностью накачки "эталонной" лампой.

На рис. 6 и 7 показано уширение резонанса в большой ( $\varnothing 150$  мм) сферической ячейке и маленькой ( $\varnothing 50 \times 70$  мм) цилиндрической ячейке соответственно.

Можно видеть, что в обоих случаях лазерная накачка в 1.7 раза эффективнее (вследствие монохроматичности лазерного излучения) по отношению к уширению резонанса, чем ламповая. Следовательно, для достижения оптимального уширения резонансной линии при лазерной накачке необходима интенсивность в  $k_p = 1.7$  раза меньшая, чем при ламповой накачке, и соответственно амплитуда дробовых шумов при лазерной

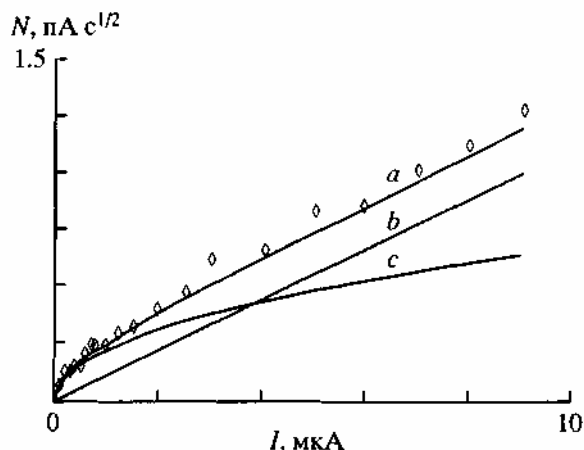


Рис. 5. Зависимость амплитуды шумов интенсивности лазерного излучения  $N$  от интенсивности света / *a* - полный шум лазера, *b* - избыточный шум, *c* - дробовый шум.

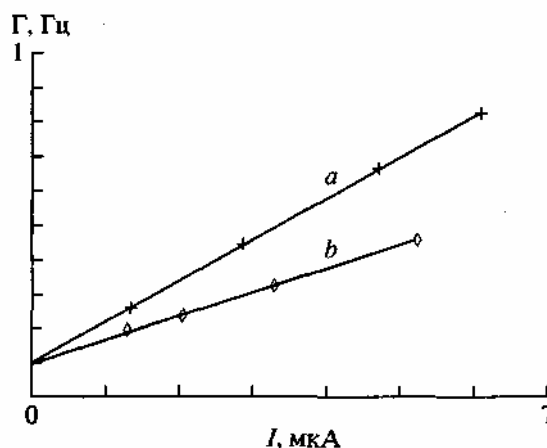


Рис. 6. Зависимость ширины резонанса  $\Gamma$  от интенсивности света / (большая ячейка), *a* - лазер, *b* - лампа.

накачке меньше в 1.3 раза. Более того, оказалось, что лазерный свет примерно в  $k_d = 1.8$  раза эффективней по регистрации сигнала, чем свет лампы. Таким образом, фактор качества при переходе от лампы к лазеру возрастает в  $k = k_p k_d = 2.3$  раза.

Рис. 8 демонстрирует результаты измерений зависимости среднеквадратичной вариационной чувствительности от интенсивности света накачки. Измерения проводились при температуре ячейки  $T_c = 30^\circ C$ , при которой вклад спин-обменного уширения в общую ширину резонанса пренебрежимо мал. Вариационная чувствительность измерялась по среднему квадрату шумов при времени измерения 100 с. Кривая вариационной чувствительности имеет экстремум при интенсивности  $\approx 2.5$  мкА, что соответствует примерно трехкратному уширению резонанса. Абсолютная

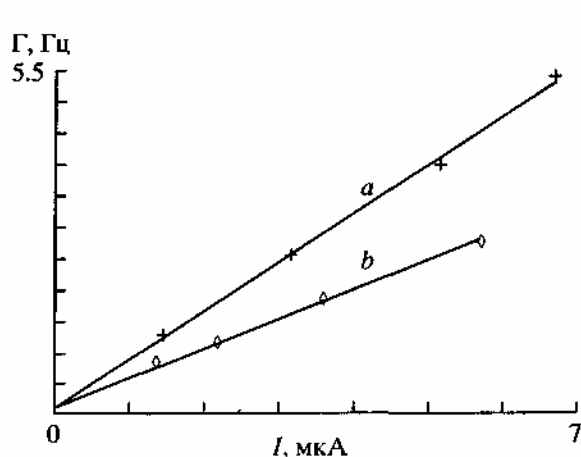


Рис. 7. Зависимость ширины резонанса от интенсивности света (маленькая ячейка), *a* - лазер, *b* - лампа.

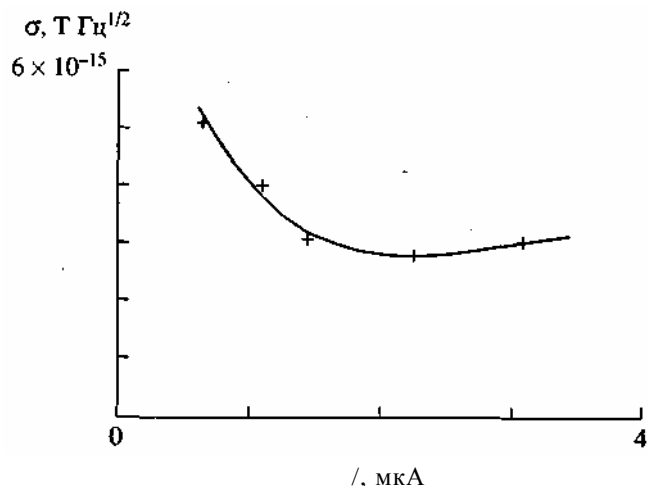


Рис. 8. Зависимость среднеквадратичной вариационной чувствительности от интенсивности света накачки.

величина вариационной чувствительности достигает  $2.7 \times 10^{-15} \text{ Т} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ , тогда как измеренная при тех же условиях чувствительность магнитометра, накаченного лампой, составляет  $6.0 \times 10^{-15} \text{ Т} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ . Рис. 9, 10 приводятся в качестве примера предельной чувствительности калиевого магнитометра; на них приведены: *a* - записи  $M_x$ -резонансов (коэффициент усиления системы  $k_0$ ), *b* - изменение сигнала при отстройке частоты радиополя на 0.1 Гц, *c* - записи шумов фототока ( $k = k_0 \times 1000$ ) при  $\tau = 0.1 \text{ с}$  ( $\Delta f = 15 \text{ Гц}$ ), *d* - записи темновых шумов фотоприемника ( $k = k_0 \times 1000$ ).

Приведенные на рис. 9, 10 данные получены при температуре ячейки  $T_c = 42^\circ\text{C}$ ; данная темпе-

Артура близка к оптимальной для данной геометрии эксперимента. Данные рис. 9, 10 соответствуют чувствительности  $1.8 \times 10^{-15} \text{ Т} \cdot \text{Гц}^{1/2}$  (лазерная накачка) и  $3.5 \times 10^{-15} \text{ Т} \cdot \text{Гц}^{1/2}$  (накачка лампой), что подтверждает высокую эффективность лазерной накачки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, результаты работы демонстрируют высокую эффективность лазерной накачки по сравнению с традиционными методами накачки; благодаря применению лазерной накачки достигнуто рекордное значение чувствительности

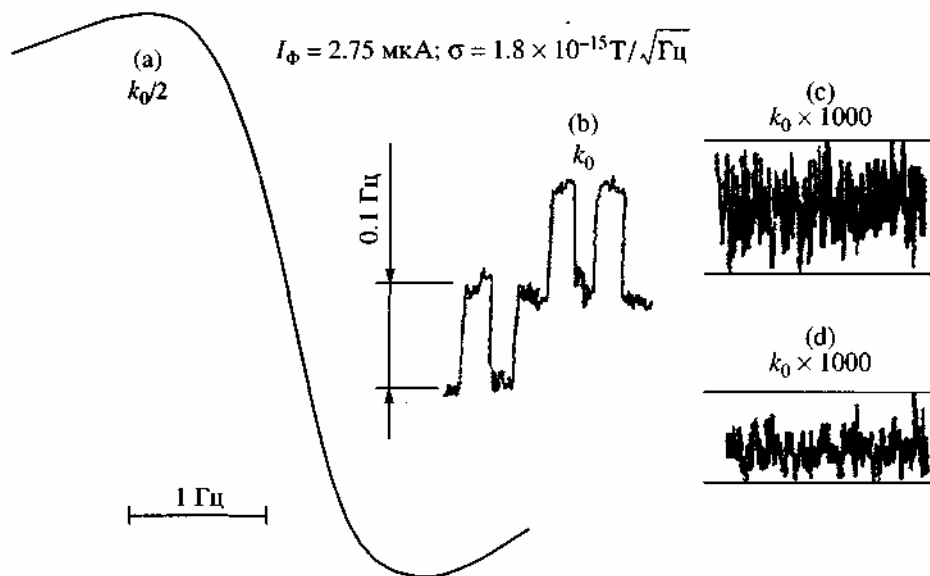


Рис. 9. Вариационная чувствительность при лазерной накачке.

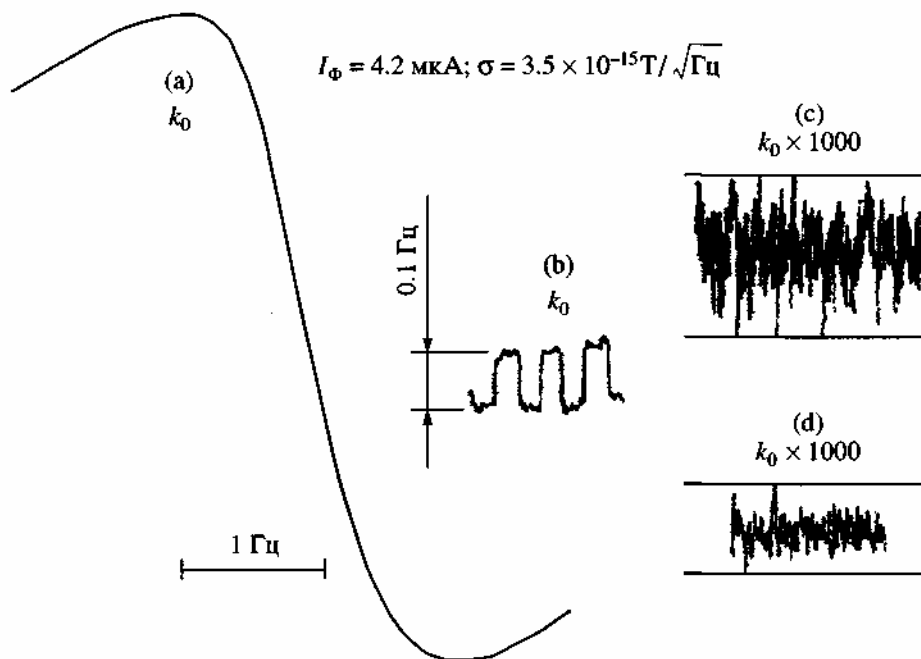


Рис. 10. Вариационная чувствительность при ламповой накачке.

магнитометрического датчика ( $1.8 \text{ а } 10^{-15} \text{ Т Гц}^{1/2}$ ). Показано, что в диапазоне интенсивностей, необходимых для оптической накачки  $^{39}\text{K}$ , амплитудные флуктуации лазерного излучения могут быть сведены к дробовым.

Необходимо также отметить следующие особенности и перспективы применения лазерной накачки.

1. Применение лазерной накачки позволяет: а) максимизировать интеграл перекрытия спектра излучения с линией поглощения и б) минимизировать штарковские сдвиги измеряемого перехода, возникающие под действием света накачки (световые сдвиги).

2. Применение лазерных источников накачки позволяет передавать свет накачки к датчику на практически неограниченные расстояния посредством моноволоконных световодов, что позволит гарантировать практически полное отсутствие магнитных помех.

3. Возможно использование одного источника света для накачки нескольких разнесенных в пространстве датчиков.

4. Использование лазера позволяет реализовать новые перспективные схемы накачки, такие как а) схема накачки модулированным светом (резонанс биений), позволяющая исключить радиочастотное поле - один из существенных источников систематических ошибок магнитометра; б) схема магнитометра на сверхтонкой структуре атомов  $^{39}\text{K}$  ("СТС-магнитометр" с многократно повышенной чувствительностью по

сравнению с СТС-магнитометром с ламповой накачкой).

В заключение отметим, что сегодня имеется ряд технических ограничений применения лазеров в качестве источников накачки. Это, во-первых, большие по сравнению с лампой габариты и энергопотребление системы лазер + схема стабилизации; во-вторых, существенно меньшая устойчивость к вибрациям и акустическим воздействиям; наконец, блок лазерной накачки много дороже блока ламповой накачки. Однако в условиях быстрого прогресса в технике диодных лазеров можно надеяться на скорое преодоление этих ограничений.

Авторы выражают благодарность доктору А.В. Грину (А. W. Green, Управление Геологии США) за интерес к работе и поддержку.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sato T., Nikuni M., Sato S., Shimba M. // *Electr. Lett.* 1988. V. 24. № 7. P. 429 - 431.
2. Valenzuela R.A., Cimini L.I., Wilson R.W., Reichmann K.C., Griot A. // *Electr. Lett.* 1988. V. 24. № 12. P. 725 - 726.
3. Yabuzaki T., Kitano M. // *Recent progress in frequency stabilization of diode laser.* 1988. P. 32 - 37.
4. Александров Е.Б. // *ЖТФ.* 1990. Т. 60. С. 3. С. 162 - 166.
5. Акульшин А.М., Величанский ВЛ., Крашенинников М.В., Саутенков В.А., Смирнов В.С., Тумайкин А.М., Юдин С.И. // *ЖЭТФ.* 1989. Т. 96. В. 7. С. 107- 116.

6. Akulshin A.M., Sautenkov V.A., Velichansky V.L., Zibrov A.S., Zvekrov M.V. // Opt. Comms. 1990. V. 77. № 4. P. 295 - 298.
7. Будкин Л.А., Величанский В.Л., Зибров А.С., Ляляскин А.А., Пененков М.Н., Пухтелев А.И. // Квант. электрон. 1990. Т. 17. № 3. С. 364 - 370.
8. Wieman C., Hollberg Leo. // Rev. Sci. Instrum. 1991. V. 62. №1. P. 1-20.
9. Александров Е.Б., Мамырин А.Б., Якобсон Н.Н. // ЖТФ. 1981. Т. 51. С. 607 - 612.
10. Bendals N., Duong H., Violle J.L. // J. Phys. B: At. Mol. Phys. 1981. V. 14. P. 4231 - 4250.
11. Александров Е.Б. // ОМП. 1988. № 12. С. 27 - 34.
12. Aleksandrov E.B., Bonch-Bruevich V.A. // Optical Engineering. 1992. V. 31. №4. P. 711 -717.
13. Akulshin A.M., Nikitin V.V., Sautenkov V.A., Vasiliev V.V., Velichansky V.L., Yurkin E.K., Zibrov A.S. Frequency Standards and Metrology / Ed. by Marchi A.De. Springer-Verlag, Berlin; Heidelberg, 1989. 236 p.