

ナノスケール物性研究部門

Division of Nanoscale Science

ナノスケール物性研究部門では、様々な低次元ナノスケールデバイスと物質を対象とした研究を行っている。このナノスケール構造は、電子ビームリソグラフィーや集束イオンビーム加工を用いてナノスケール電子デバイスを作製する方法や、薄膜成長中に自発的に形成される方法や、原子レベルで秩序だった表面へのナノスケール層の堆積など、様々な手法を利用して材料や電子デバイスを作製している。これらの材料は、走査型プローブ顕微鏡を用いた表面の空間分解物性研究や、様々な低温輸送・磁気輸送技術を用いた特性評価を行っている。最近では、ナノスケールの材料やデバイスの開発と、物性研究所で利用可能な量子計測法を組み合わせることで、新しい微細加工ができる施設を設置した。この施設では、当研究所の微細加工・分析ツールを活用し、低温や高磁場などでの様々な量子計測に適したデバイスの作製を支援している。最近の研究テーマは、二次元電子ガス（2DEG）デバイスにおけるスピン流の研究界面や、ヘテロ構造におけるスピン変換現象の探索、スピントロニクスデバイスの開発、単結晶表面に形成されたナノ構造における超伝導やトポロジ状態の走査プローブによる解明、自己組織化ナノ構造体の薄膜作製法の創成などである。

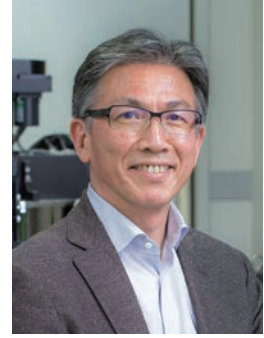
The Division of Nanoscale Science brings together laboratories working on a variety of low-dimensional nanoscale devices and materials. The nanoscale systems that we study are built either by fabricating nanoscale electronic devices, typically by electron beam lithography or focused ion beam milling, or formed spontaneously during thin film growth or by deposition of nanoscale layers on atomically well-ordered surfaces. We use scanning probe microscopes for spatially-resolved physical property studies on surfaces and a variety of low-temperature transport and magnetotransport techniques for materials characterization and property analysis. We have recently started a new microfabrication facility for combining nanoscale materials and device studies with quantum measurement methods available at ISSP. The facility helps researchers to utilize the microfabrication and analytical tools in our laboratories to prepare suitable device structures for a variety of quantum measurements at low temperatures, high magnetic fields, etc. The recent research topics include studies on spin currents in nanoscale 2DEG devices, exploration of spin-to-charge current conversion phenomena at interfaces and heterostructures, development of spintronic devices, scanning-probe studies of superconductivity and topological states in nanostructured formed on single crystal surfaces, and development of thin film methods for fabricating self-organized nanostructured materials.

部門主任 リップマー ミック
Leader LIPPMAA, Mikk

大谷研究室 Otani Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 トポロジカルスピントロニクス
Topological spintronics
- 2 分子スピントロニクス
Molecular spintronics
- 3 磁気スピンホール効果の発現機構の解明と機能性の開拓
Elucidation of the mechanism of the magnetic spin Hall effect and development of functionality
- 4 磁気弾性強結合による高効率スピン流生成
Efficient pure spin current generation by magnon-phonon coupling



教授 大谷 義近
Professor OTANI, Yoshichika

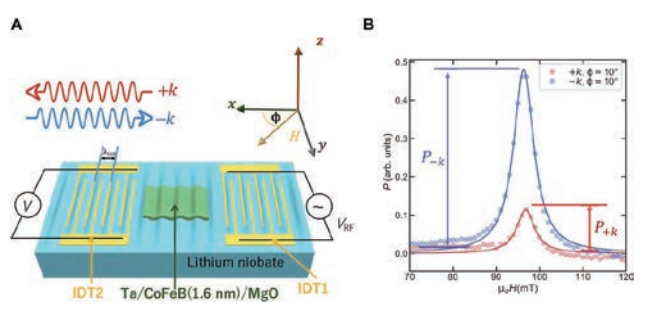
専攻 Course
新領域物質系
Adv. Mat., Frontier Sci.



助教 一色 弘成
Research Associate
ISSHIKI, Hironari

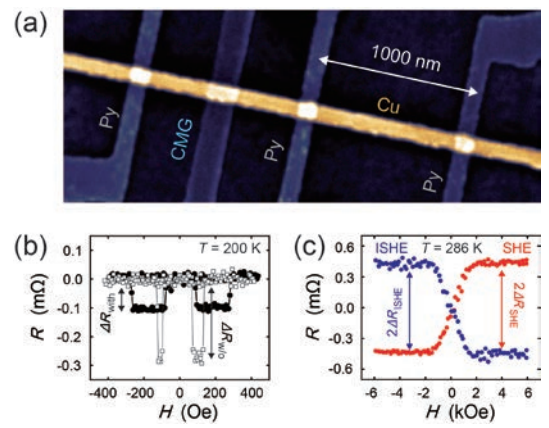
20世紀末に登場した「スピン流」の概念は、電流とスピン流を結びつけて効果的に利用する学理を体系化した。その結果、スピントロニクス研究は、電荷・スピン・フォノン・フォトン・マグノン等の準粒子が、固体中のスピンを媒介として、相互に変換される「スピン変換科学」として発展した。最近では、さらにこのスピン変換科学は、準粒子が結合したマグノンポーラロンなどの新奇準粒子状態を生成する強結合スピントロニクスとして新展開している。これらのスピンを媒介とする変換・結合現象は、比較的単純な接合界面近傍のナノスケール領域で生じることが多く、優れた汎用性と応用性を持っている。我々の研究室では基礎量子物性の観点から、スピンを媒介した新奇な準粒子変換や結合の開拓と発現機構の解明に取り組んでいる。さらに微細加工技術を駆使して、開拓した準粒子変換・結合を利用したスピン変換素子の研究開発を行っている。

The concept of “spin current”, which appeared at the end of the 20th century, established the principle of effectively using electric and spin currents. Thereby, spintronics research has evolved as a “spin conversion science” in which quasiparticles such as electric charges, spins, phonons, photons, and magnons are converted to each other through spins in solids. More recently, this spin conversion science has evolved into strong coupling spintronics, producing novel coupled quasiparticles, such as magnetic polarons. Since these spin-mediated conversion/coupling phenomena often occur in the nanoscale region near the relatively simple junction interface, they have excellent versatility and applicability. From the viewpoint of fundamental solid-state physics, our laboratory is developing novel quasiparticle conversions and coupling mediated by spins and elucidating their mechanisms. We also research and develop nanoscale spin conversion/coupling devices based on the quasiparticle conversion and coupling that we have elucidated using microfabrication technology.



Ta / CoFeB / MgO における磁気弾性波の非相反伝搬。(A) ギガヘルツ周波数で表面弾性波 (SAW) を FM 層と結合するデバイスの模式図。(B) SAW 波数 + k および -k におけるスピン波共鳴条件付近の表面弾性波の減衰 $P_{\pm k}$ 。

Nonreciprocal propagation of magnetoacoustic waves in Ta/CoFeB/MgO. (A) Device schematics of SAWs coupling to an FM layer at gigahertz frequencies. (B) Attenuation of acoustic waves, $P_{\pm k}$, near a spin-wave resonance condition for SAW numbers $+k$ and $-k$.



Weyl 強磁性体 Co_2MnGa の巨大スピンホール効果。(A) 非局所配置法測定素子の SEM 像。(B) Co_2MnGa 細線の有無に対応した非局所スピンバルブ信号。(C) Co_2MnGa のスピンホール効果と逆スピンホール効果の信号。

Giant spin Hall effect of a Weyl ferromagnet Co_2MnGa . (a) SEM image of a non-local spin valve structure. (b) The non-local spin valve signals with and w/o Co_2MnGa wire. (c) The signals of spin Hall effect and its inverse of Co_2MnGa .



研究テーマ Research Subjects

- 1 量子電荷・スピン輸送現象
Quantum transport in charge and spin freedoms
- 2 量子構造を用いた多体効果の研究
Study of many-body effects in quantum structures
- 3 異対称性ハイブリッド構造に生じる物理現象
Physics at interfaces between the phases with different symmetries
- 4 量子ホール効果
Quantum Hall effect



教授 勝本 信吾
Professor KATSUMOTO, Shingo

専攻 Course
理学系物理学
Phys., Sci.



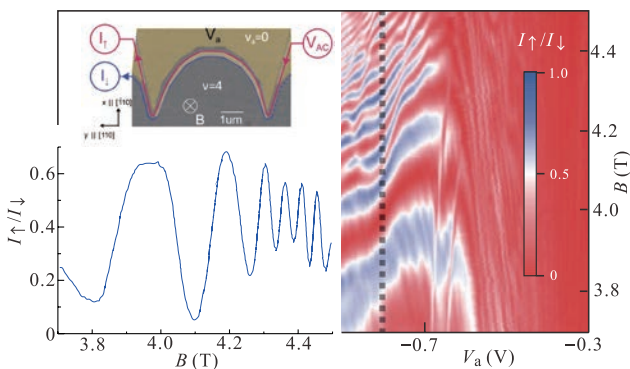
助教 遠藤 彰
Research Associate
ENDO, Akira

半導体や金属の超薄膜成長技術、これらを微細加工する技術を用いて、量子井戸、細線、ドットなどのナノ構造中の量子効果、多体効果、強磁場中2次元電子系に現れる量子ホール効果を調べている。電子スピン、核スピンの織りなすスピン現象、非平衡・非断熱量子遷移に伴う物理現象の研究を行っている。

量子輸送現象をスピン自由度に広げる研究として、ナノ構造とスピン軌道相互作用を組み合わせた試みを行っている。ナノ構造を使い、空間反転対称性を破り局所的な軌道角運動量を導入することで、新しいタイプのスピン軌道相互作用を発生させることができる。一例が、量子ホール強磁性エッジ状態の屈曲を用いた非断熱スピン操作である。この系では、エッジ状態（軌道自由度）とスピン自由度が量子エンタングルしており、軌道操作とスピン操作の利点を実際上、同じ自由度に適用できる。非断熱スピン回転を伴う電流による超伝導制御など、新奇デバイスへの応用も期待される。

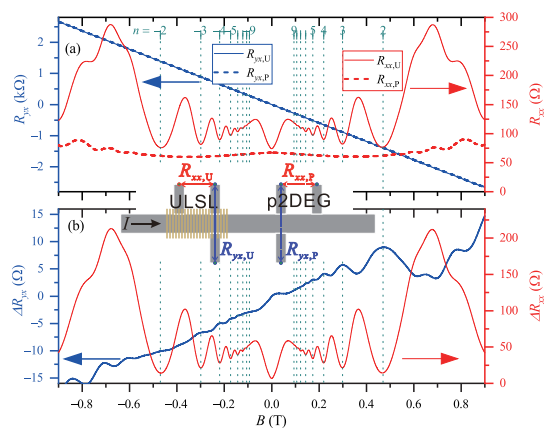
With the epitaxial growth of semiconductor and metallic films and nanofabrication techniques, we study quantum effects in low dimensional systems like quantum dots, wires and wells. Our research also spans some applications of the physics of electron and nuclear spins for so-called spintronics.

To expand the concept of quantum transport to spin degree of freedom, we have tried to create spin currents in quantum structures. The nanostructures enable us to introduce new types of spin-orbit interaction by breaking the spatial inversion symmetry and creating a local orbital angular momentum. An example is the non-adiabatic unitary operation on electron spins in quantum Hall ferromagnetic edge states. Because the spin freedom and the edge states (orbital freedom) are maximally entangled in this system, the spin and the orbital operations can be utilized equivalently. Similar non-adiabatic spin rotation by the normal current can be applied to control superconductivity in a novel device.



スピン偏極量子ホールエッジ状態を使ったビームスプリッタ。左上：電極配置。左下：このビームスプリッタを使った量子干渉計出力の磁場依存性。右：同出力のゲート電圧および磁場に対するカラープロット。

Beam splitter of spin-polarized quantum Hall edge states. Upper left: Configuration of gate electrodes. Lower left: Output of an interferometer which utilizes the beam splitter, as a function of magnetic field. Right: Color plot of the interferometer output on the plane of gate voltage and magnetic field.



(a) 1次元周期的ポテンシャル変調の有る場合（実線）、無い場合（破線）の2次元電子系のホール抵抗 R_{yx} と磁気抵抗 R_{xx} 。(b) R_{yx} と R_{xx} の変調による増分。 R_{yx} にも整合性振動が観測されている。

(a) Hall resistance R_{yx} (left axis) and magnetoresistance R_{xx} (right axis) of a two-dimensional electron gas with (solid line) and without (dashed line) the unidirectional periodic potential modulation. (b) Increment in R_{yx} and R_{xx} attributable to the modulation. Commensurability oscillations are clearly observed also in R_{yx} .



長谷川研究室 Hasegawa Group

研究テーマ Research Subjects

- 1 低温 STM による特異な超伝導 / トポロジカル物性の探索
Exploration of peculiar superconducting / topological states using low-temperature STM
- 2 マイクロ波導入スピン偏極 STM によるナノスケール磁気共鳴とスピンドYNAMIKS
Nanoscale detection of magnetic resonances and spin dynamics by microwave-assisted spin-polarized STM
- 3 スピン偏極走査ポテンシオメトリによるスピン流の実空間計測
Real-space distribution of spin currents by spin-polarized scanning tunneling potentiometry
- 4 データ科学支援による高効率局所電子状態計測
Effective collection of local density of states with an assist of data science



教授 長谷川 幸雄
Professor HASEGAWA, Yukio

専攻 Course

工学系物理学
App. Phys., Eng.



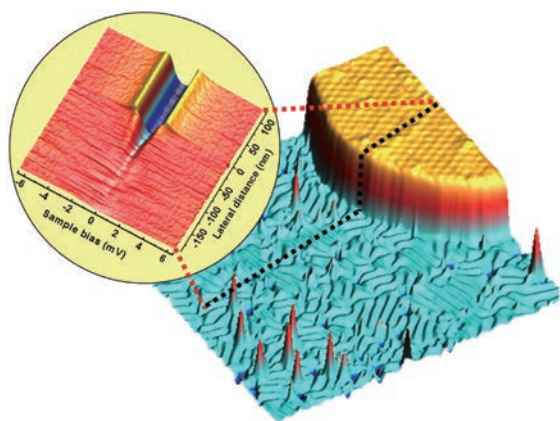
助教 土師 将裕
Research Associate
HAZE, Masahiro

走査トンネル顕微鏡 (STM) は、その像を通じて表面の原子構造を明らかにするのみならず、トンネル分光測定によりサブナノ領域での電子状態に関する知見を与え、さらにはスピン偏極 (SP-) STM による局所磁気特性や表面スピン構造を引き出すことができる。

長谷川研究室では、極低温強磁場で動作する STM 装置を用いて、表面超伝導など反転対称性の破れた二次元系での超伝導特性、磁性体との近接効果により誘起される特異な超伝導・トポロジカル状態の観測を試みている。また、SP-STM による磁性薄膜でのスピンスパイラルなど特異な局所磁気構造観察、スピン偏極局所ポテンシオメトリによるスピン流計測、さらにはマイクロ波導入による磁気共鳴検出を通じた局所スピンドYNAMIKSの研究等も推進しており、プローブ顕微鏡の新たな計測手法を開発することにも取り組んでいる。

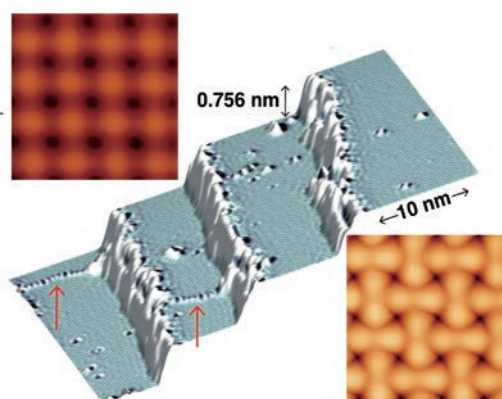
Scanning tunneling microscopy (STM) reveals not only atomic structure of surfaces but also electronic states of sub-nanometer areas by tunneling spectroscopy. With a function of spin-polarized (SP-) STM, the microscope also provides local magnetic properties and surface spin structures, and with inelastic tunneling spectroscopy (IETS), various excitation energies can be extracted.

In Hasegawa-lab., by using STMs operated in ultralow temperature and high magnetic field, peculiar local superconducting and topological states that are found e.g. at surfaces, where inversion symmetry is broken, and in the proximity with ferromagnetic and topological materials, have been explored. We have also studied local magnetic properties of nano magnets, peculiar spin-spiral structures, and energy dispersion of surface magnons using SP-STM and SP-IETS. We have also explored unique functionality of the probe microscopy; recent examples include the investigation of local spin dynamics through the detection of magnetic resonances using microwave-assisted SP-STM, spin current detection using SP-scanning tunneling potentiometry, and efficient collection of local density of states based on data-driven science.



超伝導金属界面での近接効果。単原子層 Pb (水色、金属相) と Pb 薄膜 (黄色、超伝導相) の界面でのトンネル分光から、超伝導特性が界面から約 40nm にわたって染み出している様子が観察される。

Proximity effect at superconductor/metal interface. Tunneling spectra taken around an interface between 1ML-Pb layer on Si (blue, normal metal) and a Pb thin film (yellow, superconductor) indicate the penetration of superconductivity into the metal layer with a decay length of 40 nm.



重い電子系物質 CeCoIn₅ で観測された表面軌道秩序。Co 原子が正方配列した面 (中央、左上図) で、探針を近づけて STM 像 (右下図) を撮ると、ダンベル状の d 軌道の秩序配列状態が観察される。

Surface-induced orbital ordered states observed on a heavy-fermion material CeCoIn₅. In STM images taken on a Co-terminated surface in standard conditions, round-shaped Co atoms are observed (center and upper-left images). In STM images taken in closer distances (lower-right) we observed an ordered phase of dumbbell-shaped d-orbitals.



研究テーマ Research Subjects

- 1 パルスレーザー堆積法による酸化物薄膜およびヘテロ構造の作製
Growth of thin oxide films and heterostructures by pulsed laser deposition
- 2 水分解光電極反応の高効率化に向けた酸化物半導体材料の開発
Development of oxide photoelectrode materials for photocatalytic water splitting
- 3 酸化物ナノ構造およびナノコンポジット薄膜の合成
Synthesis of nanostructures and nanocomposite thin films
- 4 気水界面における分子配向のその場観察
In situ tracking of molecular motions and orientations at the air-water interface



教授 リップマー ミック
Professor LIPPMAA, Mikko

専攻 Course

新領域物質系

Adv. Mat., Frontier Sci.



助教 森 泰蔵
Research Associate
MORI, Taizo

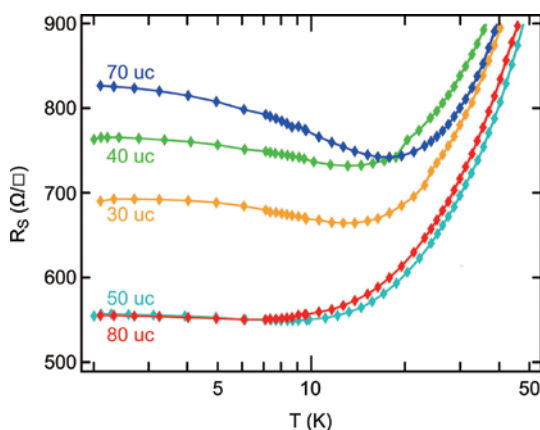
二次元電子ガス層は様々な酸化薄膜界面に形成される。二次元電子ガスが発現するよく知られた酸化物として、SrTiO₃にLaAlO₃やLaTiO₃とを組み合わせたヘテロ構造がある。我々の研究室では、SrTiO₃からなるヘテロ構造内界面に位置する量子井戸のキャリアトラッピングに結晶欠陥がおよぼす影響について研究している。特に、我々は二次元電子ガス層の抵抗率が、10 K 未満において増加に転じることを発見し、この反転が薄膜の成長条件や厚さに依存することを見出した。この現象は、ヘテロ構造内に多重のキャリア層が存在することに関連している。ヘテロ構造の抵抗率はゲート電圧に依存するが、単調に変化せずメモリー効果を示す(右図)。これは、一部のキャリアがトラップされ、ヘテロ構造内から恒久的に除去されることを示している。我々は、このトラップがどこで発生しているかを突き止め、酸化物ヘテロ構造による二次元電子ガスの低温輸送特性において、キャリアトラップの影響を除去する方法を探求している。

Two-dimensional electron gas (2DEG) layers can form at various oxide interfaces. Some of the best known oxide 2DEGs occur in heterostructures that combine SrTiO₃ with LaAlO₃ or LaTiO₃. In our recent work, we have studied the effects of crystal defects on the accumulation of carriers in quantum wells that form at such interfaces.

In particular, we find that the low-temperature resistivity of the 2DEG layer often shows an upturn below about 10 K (left) and this upturn is dependent on the particular thin film growth conditions and thin film thicknesses.

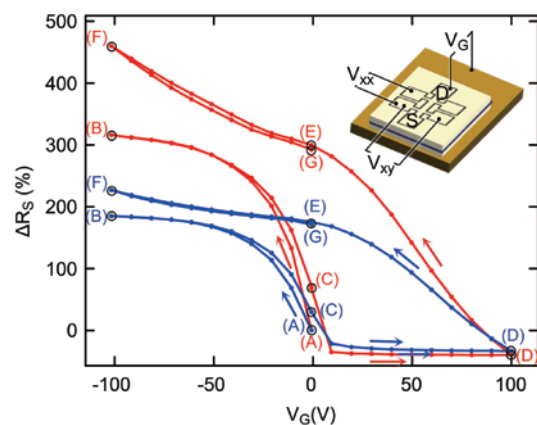
This type of behavior is related to the presence of multiple parallel layers of carriers in the heterostructure.

As shown on the right, the resistivity of the heterostructures can be changed by applying an electric field with a gate electrode. However, the resistivity behavior is not monotonic and shows a memory effect, which indicates that some of the carriers are trapped and permanently removed from the heterostructure. In our work we attempt to determine where the trapping occurs and find methods of eliminating the effect of carrier traps on the low-temperature transport characteristics of the oxide 2DEG heterostructures.



キャップ層の厚さにより SrTiO₃/LaTiO₃/SrTiO₃ ヘテロ構造の抵抗率の温度依存性に変化する。

Variation of the low-temperature resistivity of SrTiO₃/LaTiO₃/SrTiO₃ heterostructures with different cap layer thicknesses.



キャリア密度がそれぞれ異なる二つの SrTiO₃/LaTiO₃/SrTiO₃ ヘテロ構造において SrTiO₃ 層にキャリアがトラッピングされることでメモリー効果が発現する。

Memory effect caused by carrier trapping in SrTiO₃ in two SrTiO₃/LaTiO₃/SrTiO₃ heterostructures with different total carrier densities.





外国人客員教授 バツィル マティアス マーカス
Visiting Professor BATZILL, Matthias Marcus

2次元(2D)材料は、面内に共有結合を持ち、面直方向には化学結合を持たない。分子線エピタキシーでこのような超薄膜を成長させることができれば、弱い層間相互作用や近接効果によってのみ特性が制御される2D材料のヘテロ構造が構築可能である。また、2次元材料の端などの格子不整合部位では、トリビアルあるいはトポロジカルなエッジ状態を示すことがある。さらに、点欠陥や不純物ドーパントを用いて、2D材料に新たな機能を導入することもできる。

我々の研究では、超伝導から半導体、種々の磁気状態まで幅広い特性を持つ2次元材料として、遷移金属ダイカルコゲナイド(TMD)に注目する。これらのヘテロ構造の作製に成功すれば、ナノスケールでの近接効果を実現する構成要素となりうる。走査トンネル顕微鏡/分光は、層間相互作用・異種材料との近接効果・局所的な格子変化による状態変化を調べるのに適した手法であり、その活用が期待される。

Two-dimensional (2D) materials exhibit covalent bonding within a molecular plane and have no unsaturated chemical bonds normal to that plane. The ability to grow these extended ultrathin sheets by molecular beam epitaxy (MBE), in principle, allows an assembly of heterostructures of dissimilar 2D materials whose properties are altered only through weak interlayer interactions or proximity effects. In addition, lattice discontinuities, for example, at edges of 2D materials may exhibit trivial or topological edge states. Point defects or impurity dopants may also be used to introduce new functionalities into 2D materials.

In our studies we focus on transition metal dichalcogenides (TMDs) as a broad family of 2D materials that span a large range of properties from super- to semi-conducting and various magnetic states. These materials can be thought of as a set of building blocks that if successfully prepared in heterostructures enables the study of nanoscale proximity effects. Scanning tunneling microscopy/spectroscopy are preferred tools to investigate local modifications in TMDs due to interlayer interactions, proximity with dissimilar materials, or local lattice modifications.